

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2009/2010

Roman Šprlák

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Model tepelného pole chladiče v programu ANSYS

ANSYS Thermal Model of Heatsink

2009/2010

Roman Šprlák

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je mým původním autorským dílem, které jsem vypracoval samostatně. Literaturu a další zdroje, z nichž jsem při zpracování čerpal, v práci řádně cituji a jsou uvedeny v seznamu použitých informačních zdrojů.

V Ostravě dne 6.5.2010

.....
Roman Šprlák

Poděkování

Chci poděkovat mému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Petru Chlebišovi, CSc. za cenné rady a připomínky, které mi pomohly k vytvoření této práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na popis a simulaci tepelných polí. Uvádí jednotlivé druhy vedení tepelné energie materiálem s popisem pomocí fyzikálních zákonů. Odvod tepelné energie má značný význam pro zajištění dlouhého a bezporuchového provozu zařízení. V dnešní době, kdy je kladen velký důraz na spolehlivost a bezporuchový stav zařízení se klade důraz na co nejefektivnější odvod tepelné energie. Z tohoto důvodu jsou používány simulační programy, které využívají k výpočtu tepelného pole metodu konečných prvků. V rámci diplomové práce se zabývám simulací tepelného pole v součástech polovodičových měničů. Ve vlastní simulaci uvažuji pouze přenos tepelné energie pomocí vedení mezi polovodičovými moduly a chladičem.

Klíčová slova

Teplota, teplotní pole, vedení, proudění, sálání, emisivita, modul, model, simulace, výpočetní síť.

Abstract

This thesis is focused on the characterization and simulation of thermal fields. This thesis presents the various types of heat convection through materials with using of physical laws. Dissipation of thermal energy is making a great difference to ensure long and trouble-free operation. Nowadays, when the great emphasis on reliability and maintenance-free state apparatus consists emphasis on the most effective heat dissipation. For this reason are used simulation programs for calculating the thermal field with the finite element method. In this thesis I deal with simulation of thermal field components in the semiconductor converters. In my own simulation I have been thinking only with transfer of heat energy from the line between the semiconductor modules and the heatsink.

Key words

Temperature, temperature field, conduct, convection, emission, emissivity, module, model, simulation, computation network.

Seznam použitých symbolů

A_s	...poměrná zářivosti	(-)
A_{ε}	...poměrná pohltivost	(-)
A_{λ}	...spektrální pohltivost	(-)
c_1, c_2	...konstanty vypočtené z Planckovy konstanty	(W/m ²)
d	...plocha	(mm ²)
\bar{E}	...intenzita tepelného pole	(K.m ⁻¹)
E_s	...relativní zářivosti	(-)
E_{ε}	...relativní pohltivosti	(-)
E_{λ}	...spektrální zářivost	(-)
f	...frekvence zařízení	(Hz)
FEA	...metoda rozboru konečných prvků	
G	...tepelná vodivost	(W. K ⁻¹)
GTO	...hradlem vypínaný tyristor	
H	...koeficient přenosu tepla proudění	(-)
h	...Planckova konstanta	(J.s)
I	...elektrický proud	(A)
I_D	...proud diodou	(A)
IGBT	...bipolární tranzistor s izolovaným hradlem	
IGCT	...vypínaný tyristor	
K	...tepelná vodivost	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
L	...tloušťka pevného materiálu	(mm)
L140	...druh chladiče	
P	...tepelná výkon	(W)
P3	...druh chladiče	
\bar{q}	...hustota tepelného toku	(W.m ⁻²)
q	...tok tepla	(W)
R	...tepelný odpor	(K.W ⁻¹)
$R_{th(J-C)}$...vnitřní tepelný odpor součástky	(K/W)
$R_{th(C-H)}$...stykový tepelný odpor	(K/W)
t	...teplota uvažovaného bodu	(°C)
Δt	...tepelný spád ($\Delta t = t_2 - t_1$)	(°C)
t_2	...teplota povrchu	(°C)
t_1	...teplota kapaliny nebo plynu	(°C)
T_j	...nejvyšší přístupná teplota přechodu	(°C)
U_{RMS}	...střední hodnota napětí	(U)
v	...rychlost světla	(km/s)
W_e	...části emitované	(-)
W_r	...části odražené	(-)
W_t	...části procházející	(-)
x, y, z	...souřadnice bodu	(mm)
λ	...vlnová délka	(m)
λ_{max}	...maximální vlnová délka	(m)
ε	...energie	(J)
σ_{ε}	...Stefan-Boltzman konstanta	(W/m ² .K ⁴)
τ	...časová souřadnice bodu	(s)

Obsah

1. ÚVOD.....	- 1 -
1.1 TEPLLO.....	- 1 -
1.2 TEPELNÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU.....	- 1 -
1.3 Teoretické základy šíření tepla	- 2 -
1.4 ŠÍŘENÍ TEPLA VEDENÍM.....	- 2 -
1.4.1 Diferenciální rovnice vedení tepla v obecném tvaru - rovnice Fourier-Kirchhoffova.....	- 4 -
1.4.2 Vedení tepla rovinnou stěnou.....	- 5 -
1.5 ŠÍŘENÍ TEPLA PROUDĚNÍM.....	- 5 -
1.6 ŠÍŘENÍ TEPLA SÁLÁNÍM (RADIACÍ)	- 6 -
1.6.1 Kirchhoffův zákon	- 8 -
1.6.2 Stefan-Boltzmannův zákon.....	- 8 -
1.6.3 Planckův zákon	- 8 -
1.6.4 Planckův vyzařovací zákon.....	- 9 -
1.6.5 Wienův zákon.....	- 9 -
1.7 TEPELNÉ POLE.....	- 9 -
1.8 ANALOGIE MEZI ELEKTRICKÝM A TEPLOTNÍM POLEM	- 10 -
2. MODEL YVBRANÝCH ČÁSTÍ POLOVODIČOVÝM MĚNIČŮ.....	- 11 -
2.1 INVENTOR	- 11 -
2.2 KONSTRUKCE MODELŮ	- 12 -
2.3 MODEL Y POLOVODIČOVÝCH MODULŮ	- 12 -
2.3.1 Usměrňovač SKD50/08/A3 v provedení SEMIPONT.....	- 13 -
2.3.2 Usměrňovač SK60GB125 v provedení SEMITOP3.....	- 14 -
2.4 MODEL Y CHLADIČŮ.....	- 15 -
3. SIMULACE ROZLOŽENÍ TEPELNÝCH POLÍ.....	- 18 -
3.1 IMPORT 3D MODELŮ A NASTAVENÍ PARAMETRŮ.....	- 19 -
3.2 SIMULACE TEPELNÉHO POLE	- 22 -
3.2.1 Simulace teplotního pole na chladiči L140 se ztrátovým výkonem 100W, 300W, 500W.....	- 22 -
3.2.2 Simulace teplotního pole na chladiči P3 se ztrátovým výkonem 100W, 300W, 500W.....	- 26 -
3.2.3 Simulace teplotního pole na chladiči L140 se ztrátovým výkonem 350W.....	- 27 -
3.2.4 Simulace teplotního pole na chladiči P3 se ztrátovým výkonem 350W	- 34 -
4. TEORIE PRAKTICKÉHO MĚŘENÍ TEPELNÉHO POLE.....	- 38 -
4.1 TERMORIZNÍ MĚŘENÍ.....	- 39 -
4.2 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ A SIMULACÍ	- 40 -
5. ZÁVĚR.....	- 41 -
6. LITERATURA.....	- 42 -
7. PŘÍLOHY	- 43 -

1. Úvod

Chladiče jsou součástí elektrických zařízení, které se využívány k odvodu tepelné energie ze součástí, kde tepelná energie vzniká. Provedení chladičů je velmi rozmanité a je odvozeno od jejich použití, resp. od parametrů obvodů, které jimi chladíme.

Diplomová práce je podřízena vědomostem potřebným pro simulaci tepelného pole chladiče. V první části diplomové práce jsou nastíněny příčiny vzniku tepla v elektrických zařízeních. Uvádím základní zákony, kterým teplo podléhá, popisují varianty šíření tepla v elektrických přístrojích a teorie tepelného pole.

Dále v diplomové práci vytvářím jednotlivé modely komponentů polovodičových měničů. Jedná se o modely bezpotenciálových modulů a chladičů, které jsou vytvořeny na základě rozměrových údajů uvedených výrobcem. Modely jsou vytvořeny v programu Autocad Inventor. Z vytvořených 3D modelů vytvářím sestavy, které využiji při simulaci tepelných polí. Jelikož neznám přesné vnitřní uspořádání v bezpotenciálových modulech, nebudu provádět simulaci rozložení tepelného pole v oblasti modulu. Pro simulaci tepelných polí budu využívat simulační program Ansys. Popis práce s programem Ansys je seříděn tak, aby odpovídal struktuře vlastního programu. V první fázi seznámím s programovým prostředím programu Ansys a následně uvedu provedení importu vytvořeného 3D modelu v programu Inventor do simulačního programu Ansys. Dále určím druh simulace a popisu základních částí simulace a vytvoření jednotlivých tepelných polí. V poslední části diplomové práce porovnáím výsledky simulace tepelného pole s experimentálním měřením.

1.1 Teplo

Teplo, světlo a elektřina byly kdysi definovány jako hypotetické látky, na které se nevztahovala zemská gravitace. Z toho důvodu se jim také říkalo *imponderabilia*, čili látky které nelze zvážit. Jelikož teplo, elektrický náboj a magnetické vlastnosti se mohou přenášet z jednoho tělesa na druhé, dostali také název *Fluida* (teplo bylo speciálně nazýváno *kalorikum*).

V současné době víme, že teplo je mechanická energie neuspořádaného pohybu částic. Molekuly tuhých a kapalných látek vytvářejí kmitavé pohyby. U tuhých látek mohou molekuly kmitat dle definované polohy, která je dána strukturou pevné látky. Molekuly kapalin a plynů nejsou vázány žádnou pevnou strukturou a tudíž se mohou pohybovat relativně vysokými rychlostmi (až 1 km.s^{-1}).

1.2 Tepelné účinky elektrického proudu

Vytváření tepla v součástech elektrický zařízení je založeno na několika příčinách. Mezi ty patří:

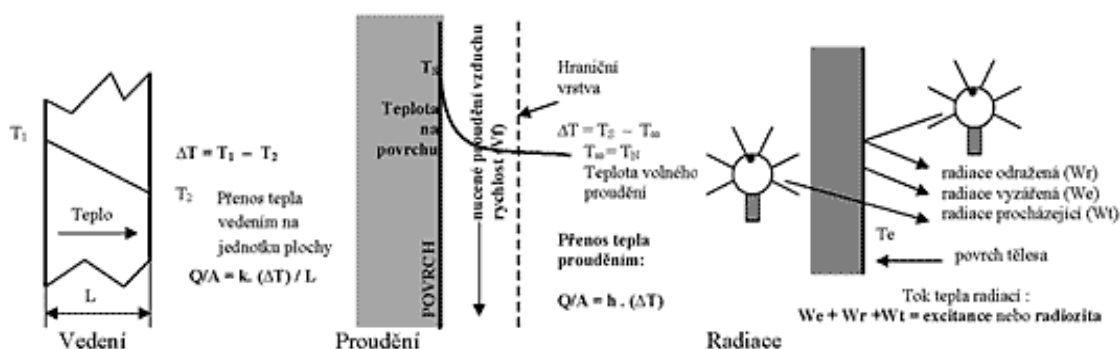
- průchod elektrického proudu proudovodnou drahou vytváří Joulovy ztráty
- vznik elektrického oblouku při spínání
- ovlivňující prostorové uspořádání vodičů vyvolává přídavné ztráty
- vznik střídavého elektromagnetického pole podél vodičů způsobující ztráty ve feromagnetických materiálech, mezi něž patří ztráty vířivými proudy a ztráty způsobené hystezí
- vznik střídavého elektromagnetického pole v aktivních částech způsobující ztráty v dielektriku

Uvedené příčiny vytváření tepla nejsou zdaleka všechny, najde se celá řada dalších možností.

1.3 Teoretické základy šíření tepla

Teplu je termální energie, která se navenek projevuje jen jako teplota tělesa. Tato teplota se dá změřit množstvím metod, pro které je definována teplotní stupnice. Přenosem tepla mezi dvěma tělesy o různých teplotách dochází k přenosu tepla z tělesa teplejšího na těleso chladnější. Známe 3 základní druhy přenosu tepla:

- Vedením (kondukcí)
- Prouděním (konvekcí)
- Sáláním (radiací)



Obrázek č. 1: Druhy šíření tepla

[9]

Teplu v reálném stavu se jen velmi málo přenáší jedním přenosem, většinou se jedná o kombinaci dvou nebo všech tří přenosů současně. Při definovaném reálném řešení můžeme jednotlivé přenosy rozdělit na jednotlivé celky a celkovou přenášenou energii dostaneme jako součet energií přenášených jednotlivými způsoby. Abychom byli schopni řešit jednotlivé přenosy, musíme se seznámit s jejich základy.

1.4 Šíření tepla vedením

Šíření tepla vedením je velmi složité a nelze je v obecném případě popsat matematicky. Proto budu při řešení přenosu tepla pracovat s zjednodušenými podmínkami, a to že přenos probíhá ve stejnorodém prostředí (prostředí, které má ve všech třech osách stejné fyzikální vlastnosti).

Vedení se především uplatňuje u pevných těles, ale také u kapalin a plynů. K přenosu energie dochází kmitáním atomů nebo molekul, při čemž se energie přesouvá od teplejší molekuly směrem k studenější. Teplu, taktéž jako elektrické nebo magnetická energie, vytváří kolem sebe tzv. tepelné pole. Toto pole je spojitá množina okamžitých teplot všech bodů ve zkoumané oblasti a je polem skalárním, proto ho můžeme definovat následně:

$$t=f(x,y,z,\tau) \quad (1.1)$$

t ...teplota uvažovaného bodu
x, y, z souřadnice bodu
 τ (sec) časová souřadnice bodu

Stacionární (ustálené) pole je speciální druh pole, kde se teplota bodů nemění s časem. Můžeme definovat:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 \quad (1.2)$$

$$t=f(x,y,z)$$

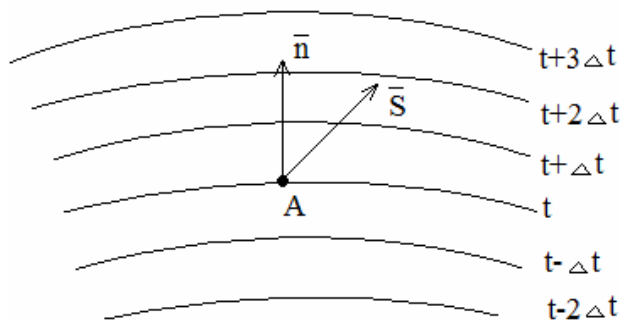
Předchozí vztahy platí pro trojrozměrné pole. Jestliže uvažujeme zvláštní případ šíření tepla rovinnou plochou, která má prakticky nekonečný rozměr a odděluje dvě prostředí o různých teplotách t_1 a t_2 , potom budeme tepelný tok počítat z následujících rovnic:

$$t=f(x,\tau) \dots \text{neustálený stav} \quad (1.3)$$

$$t=f(x) \dots \text{ustálený stav} \quad (1.4)$$

Místa se stejnou hladinou tepelné energie se nazývají izotermy (resp. izotermické plochy). Izotermické plochy jsou plochy obsahující body o stejné teplotě. Při prostupu tepla rovinnou stěnou jsou izotermické plochy rovin rovnoběžné s rovinnou rozhraní, u válcové stěny jsou to souosé válce a u kulové stěny zase soustředné koule.

Izotermy jsou křivky spojující body téže teploty. [1]



Obrázek č. 2: Izotermy, které se liší rozdílem teplot

Při pohybu z bodu A na izotermě t ve směru S přecházíme do míst s rozdílnou teplotou. Tento pohyb nabude maximální možné hodnoty, jestliže se pohybujeme z bodu A ve směru normály n k izotermě t . Při pohybu po kolmici n nastávají největší teplotní změny. [1]

Gradient teploty je limita hodnoty teplotního spádu.

$$-grad(t) = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} \bar{n}_0 \quad (1.5)$$

Jedná se o vektor kolmý na izotermickou rovinu. Vektorové pole je složeno z gradientů teplot. Pole, jestliže není nenulové, znamená, že v prostoru dochází k šíření tepla. Aby se teplo nešířilo, potom musí platit:

$$t = konst. \Leftrightarrow -grad(t) = \lim_{n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} \bar{n}_0 = 0 \quad (1.6)$$

Závislost mezi tepelným tokem a teplotním gradientem (spádem) je definována Fourierovým zákonem.

$$d\bar{Q} = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \cdot d\bar{S} \cdot d\tau \quad (1.7)$$

Druhé matematické vyjádření Fourierův zákon toku tepla vedením:

$$\frac{Q}{d} = -k \cdot \frac{(\Delta t)}{L} \quad (1.8)$$

Q	...tok tepla
d	...plocha
L	...tloušťka pevného materiálu
K	...tepelná vodivost
Δt	...tepelný spád ($\Delta t = t_2 - t_1$)

1.4.1 Diferenciální rovnice vedení tepla v obecném tvaru - rovnice Fourier-Kirchhoffova

Rovnice je definována vzorcem (1.10), výraz v závorce je Laplaceův diferenciální operátor teploty Δt . Součinitel a se nazývá součinitel teplotní vodivosti daného materiálu.

$$\frac{dt}{d\tau} = a \cdot \left[\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right] = a \cdot \Delta t \quad (1.10)$$

Součinitel teplotní vodivosti a zahrnuje 3 fyzikální konstanty materiálu (měrnou vodivost, měrnou hmotnost, měrné teplo), a komplexně charakterizuje každou látku.

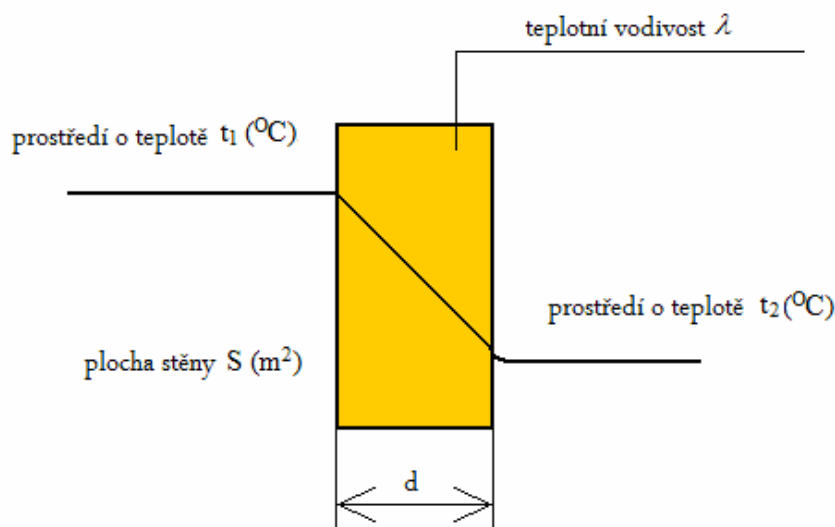
Čím vyšší je veličina a , tím rychleji se těleso ohřívá nebo ochlazuje. Odvozená diferenciální rovnice pro vedení tepla umožňuje určit rozložení teploty v uvažovaném tělese v každém místě a čase. Při řešení v definovaném případě je třeba uvedenou diferenciální rovnici doplnit. Musíme vyjít z určitých mezních podmínek platných v uvažovaném případě. Je to např. rozdělení teploty v uvažovaném tělese v čase $\tau = 0$ (počáteční stav). Další podmínkou může být vzájemné působení povrchu tělesa s okolním prostředím atd. Ve většině reálných aplikací je možné problematiku vedení tepla zjednodušit na 2 případy řešení. [1]

Nejčastěji řešenými případy jsou:

- prostup tepla rovinnou stěnou
- prostup tepla válcovou stěnou

1.4.2 Vedení tepla rovinnou stěnou

V případě zobrazeném na obr. 3 bude teplota obou rozhraní t_1 a t_2 rozdílná. Tepelný tok bude procházet stěnou zleva doprava.



Obrázek č. 3: Průchod tepla vedením

Následovně můžeme vypočítat tepelný tok procházející stěnou při stálém rozdílu povrchových teplot:

$$Q = S \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot (t_2 - t_1) \quad (1.11)$$

Bude-li stěna složena z několika různých vrstev o jiných tloušťkách materiálů s různou tepelnou vodivostí, potom musíme tepelný tok počítat podle následující rovnice:

$$Q = \frac{1}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n}} \cdot (t_2 - t_1) \cdot S \quad (1.12)$$

1.5 Šíření tepla prouděním

Šíření tepla prouděním se objevuje u pohybujících se skupenství. K přenosu dochází mezi pevným tělesem a kapalným nebo plynným skupenstvím. Volné proudění vzniká při přenosu tepla spojeného se změnou hustoty kapaliny, a potom teplejší část stoupá vzhůru jako výsledek vzrůstajícího tlaku.

Proudění může být i nucené. Při tomto proudění se využívá vnější zdroj, který uvádí kapalinu nebo plyn do pohybu. Jako vnější zdroj si můžeme představit ventilátor umístěný na povrchu nádoby s kapalinou nebo plynem. Pro vysvětlení nuceného proudění si můžeme představit tepelné proudění vzduchu výměníkem tepla pomocí ventilátoru. Ventilátor vhání vzduch do výměníku a tím je výměník ochlazován a vháněný vzduch je oteplován.

V prostřední části obrázku 1 je schéma, které zobrazuje situaci přenosu tepla z pevné části na pohybující se plyn nebo kapalinu. Šíření tepla prouděním se může uskutečňovat dvěma způsoby. Přímé vedení tepla plynem nebo kapalinou a pohybem vlastní kapaliny nebo plynu.

Newtonovo pravidlo pro chlazení pomocí vedení nám zavádí koeficient přenosu tepla h :

$$h = \frac{Q}{d} \cdot \frac{t_2}{t_1} \quad (1.13)$$

h ...koeficient přenosu tepla proudění
 Q ...je tok tepla
 d ...plocha
 t_2 ...teplota povrchu
 t_1 ...teplota kapaliny nebo plynu

Objekt desky vytváří volnou rychlost kapaliny „V“, která klesá u povrchu desky na nulu. Tato změna vzdálenosti se nazývá hraniční vrstva. Velikost hraniční vrstvy je nepřímo úměrná na volné rychlosti kapaliny. Především závisí na rychlosti kapaliny. Rychlost proudění tepla závisí na velikosti hraniční vrstvy a tepelném rozdílu t_2 a t_1 . První t_2 nám určuje teplotu povrchu a t_1 je teplota kapaliny nebo plynu mimo prostor hraniční vrstvy.

Upraveným Newtonovým pravidlem určíme přenos tepla prouděním na jednotku plochy:

$$\frac{Q}{d} = h \cdot \Delta t \quad (1.14)$$

h ... koeficient přenosu tepla proudění
 Q tok tepla
 d ... plocha
 Δt ... tepelný spád ($\Delta t = t_2 - t_1$)
 t_2 ...teplota povrchu
 t_1 ...teplota kapaliny nebo plynu

Newtonovo pravidlo nám říká, že rychlost tepelného toku se zvyšuje při rostoucím rozdílu teplot a s rostoucím koeficientem přenosu tepla. Velikost koeficientu přenosu závisí na rychlosti kapaliny nebo plynu.

1.6 Šíření tepla sáláním (radiací)

Poslední druh přenosu tepla je radiace (záření). Všechna tělesa s teplotou vyšší jak 0K vyzařuje do okolí energii ve formě elektromagnetický vln. Vlny se v prostředí šíří přímočaře a všemi směry, jak je zobrazeno v obrázku 1 s popiskem radiace.

Šíření tepla sáláním se liší od vedení a proudění následujícími vlastnostmi:

- může procházet vakuem,
- probíhá rychlostí světla a chová se jako světlo,
- uskutečňuje se elektromagnetickým zářením a absorpcí,
- přenos tepla vedení nebo proudění mezi dvěma body je závislý na rozdílu teplot mezi body, následně energie vyzařovaná z povrchu je úměrná čtvrté mocnině své absolutní teploty. Když je tepelná radiační energie přenášena mezi dvěma povrchy je úměrná třetí mocnině tepelného rozdílu mezi oběma povrchy.

Existence (radiosita) je infračervená tepelná radiace sálající z povrchu tělesa. Závisí na povrchu aktivního tělesa a můžeme ji rozdělit na tři části:

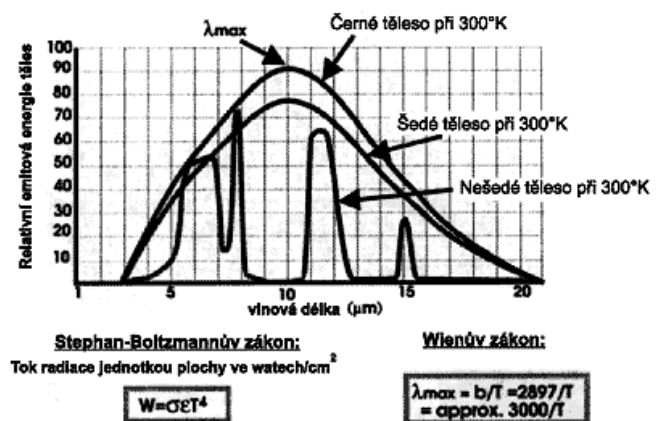
- části emitované W_e
- části odražené W_r
- části procházející W_t

Musí platit:

$$W_e + W_r + W_t = 1 \quad (1.15)$$

Lze definovat a rozlišovat tři typy povrchů těles: povrch tělesa černého, šedého a našedlého (tzv. reálného nebo spektrálního tělesa). Absolutně černý povrch tělesa definujeme jako teoretický povrch, který má jednotkovou emisivitu v celém rozsahu vlnových délek, absorbuje všechnu radiační energii. Emisivita reálného tělesa je definována jako poměr radiačních energií emitovaných z povrchu daného tělesa a tělesa černého při stejné teplotě.

Těleso absolutně černé v praxi neexistuje, je jenom teoretické. V praxi se můžeme setkat s povrchy mnohých těles barvy šedé nebo našedlé, což znamená, že emisivita tělesa je téměř konstantní s vlnovou délkou. Určení spektrálního rozdělení spektrální energie černého, šedého a našedlého tělesa při teze teplotě 300K nám zobrazuje obrázek číslo 4.



Obrázek č. 4: Spektrální rozložení tří typů emitorů na 300 K

[8]

Jestliže je vyzařující těleso černé, potom má emisivitu rovnou 1 a neodráží ani jím neprochází žádná energie. Těleso šedé má potom spektrální rozložení podobné rozložení tělesa černého, ale protože emisivita je menší než jedna, může také energii odrážet nebo propouštět. U našedlého tělesa je energie odrážena a přenášena.

Teplota povrchu je závislá pouze na části emitované W_e . Základem bezkontaktního měření teploty a IR termografie je měření tepelné infračervené radiace.

Přenos tepla radiací se řídí fyzikálními zákony:

- Kirchhofův zákon
- Stefan-Boltzmanův zákon
- Planckův zákon
- Planckův vyzařovací zákon
- Wienův zákon

1.6.1 Kirchhofův zákon

Definice: Poměr zářivosti E_s a relativní pohltivosti E_c je závislý pouze na absolutní teplotě tělesa t a nezávisí na barvě povrchu tělesa. Pro absolutně černé těleso je poměrná pohltivost A_c rovna 1 (pohlcovány všechny dopadající paprsky). [1]

$$\frac{E_s}{E_c} = f(t) = \frac{A_s}{A_c} = E_c \quad (1.16)$$

Uvedená rovnice je rovna úhrnné zářivosti absolutně černého tělesa. Z toho plyne, že černé povrchy nejsilněji vyzařují. Kirchhofův zákon platí pro úhrnnou zářivost, ale také i pro spektrální zářivost E_λ a pohltivosti A_λ . Jejich poměr závisí na teplotě t a vlnové délce λ .

$$\frac{E_{\lambda s}}{E_{\lambda c}} = f(t, \lambda) = E_{\lambda c} \quad (1.17)$$

1.6.2 Stefan-Boltzmanův zákon

Úhrnná zářivost E_c absolutně černého tělesa roste úměrně se čtvrtou mocninou absolutní teploty t .

$$E_c = \sigma_c \cdot t^4 \quad (1.18)$$

$$\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{,K}^4$$

σ_c ...Stefan-Boltzmanova konstanta (součinitel sálání absolutně černého tělesa)

1.6.3 Planckův zákon

V zákoně je předpoklad, že záření je tokem elementárních kvant ϵ energie (tzv. fotonů), které jsou úměrné kmitočtu f daného zařízení.

$$E_f = h \cdot f = \frac{h \cdot \nu}{\lambda} \quad (1.19)$$

h	...Planckova konstanta
v	...rychlost světla
f	...frekvence zařízení
λ	...vlnová délka

$$\frac{E_{\lambda S}}{E_{\lambda C}} = konst. = \varepsilon < 1 \quad (1.20)$$

$$\sigma_{\varepsilon} = \varepsilon \cdot \sigma_{\varepsilon}$$

$$E_{\varepsilon} = \varepsilon \cdot \sigma_{\varepsilon} \cdot t^4$$

Úhrnná zářivost tělesa šedého E_{ε} je ε x menší než zářivost tělesa černého při totožné teplotě. U vyzařování paprsků určité vlnové délky platí přímá úměra s paprsky pohlcujícími tělesem o stejné vlnové délce.

1.6.4 Planckův vyzařovací zákon

V zákoně se uvádí spektrální závislost intenzity záření absolutně černého tělesa na jeho povrchové teplotě.

$$E_{\lambda, t} = \frac{2 \cdot c_1}{\lambda_w^5 \cdot (\exp\left[\frac{c_2}{\lambda_w \cdot t}\right] - 1)} \quad (1.21)$$

Kde $c_1, c_2 \dots$ konstanty vypočtené z Plackovy konstanty ($c_1 = 5,95 \cdot 10^{-17} \text{ W/m}^2$, $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$)

1.6.5 Wienův zákon

E_{λ} je spektrální záření dané teplotou nejintenzivnější vlnové délky λ_{\max} , která je nepřímo úměrná této teplotě. Z toho plyne, že při nízké teplotě těleso vyzařuje dlouhovlnné záření. Při zvyšující se teplotě se zářivost zvyšuje, ale maximum spektra se rovněž zvyšuje a posouvá se ke kratším vlnovým délkám.

$$\lambda_{w, \max} = \frac{2.892 \cdot 10^{-3}}{t} \quad (1.22)$$

1.7 Tepelné pole

Základní charakteristika tepelného stavu prostředí, na které je aplikováno zjednodušení prostředí, kterým se teplo šíří. Prostor rozdělujeme na izotropní a homogenní. Tento tepelný stav prostředí je popsán tepelným polem. Jedná se o množinu okamžitých teplot ve všech bodech vybrané části prostoru. Toto tepelné pole je spojitě, tudíž mezi dvěma nekonečně blízkými body odpovídá

i nekonečně malý rozdíl teplot. Tepelné pole je možné dále charakterizovat jako pole skalární. Potom můžeme využít rovnice uvedené v oddílu 1.3.

1.8 Analogie mezi elektrickým a teplotním polem

Elektrické a tepelné pole jsou velice podobná. Obě dvě pole jsou nevírová, zřídlová. Tato analogie podstatně ulehčuje výpočet tepelného pole v jednodušších soustavách a v ustáleném stavu. Tepelné pole můžeme definovat následujícími veličinami.

<p>Termodynamická teplota</p> <ul style="list-style-type: none"> - nulová teplota $-273,15^{\circ}\text{C}$ - je to skalár - jednotka (K) <p>Teplotní rozdíl</p> <ul style="list-style-type: none"> - $\Delta\Theta = \Theta_2 - \Theta_1$ - $\Delta t = t_2 - t_1$ - je to skalár - jednotka $\Delta\Theta = (\text{K})$, $\Delta t = (^{\circ}\text{C})$ <p>Součinitel teplotní roztažnosti</p> <ul style="list-style-type: none"> - jednotka $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ <p>Tepelný měrný odpor</p> <ul style="list-style-type: none"> - $\frac{1}{\lambda}$ - jednotka $(\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1})$ <p>Tepelná vodivost</p> <ul style="list-style-type: none"> - $G = \frac{\lambda \cdot s}{l}$ - jednotka $(\text{W} \cdot \text{K}^{-1})$ <p>Tepelný odpor</p> <ul style="list-style-type: none"> - $R = \frac{l}{\lambda \cdot s}$ - jednotka $(\text{K} \cdot \text{W}^{-1})$ 	<p>Intenzita tepelného pole</p> <ul style="list-style-type: none"> - velikost teplotního spadu=gradient teploty - $\vec{E} = \frac{\partial\Theta}{\partial n} = \frac{\partial t}{\partial n} = -\text{grad}\Theta$ - je to vektor - n je normála k izotermální hladině - jednotka $(\text{K} \cdot \text{m}^{-1})$ <p>Hustota tepelného toku</p> <ul style="list-style-type: none"> - $\vec{q} = \lambda \cdot (-\text{grad}\Theta)$ - je to vektor, má směr i velikost - jednotka $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$ <p>Tepelný tok</p> <ul style="list-style-type: none"> - $P = \int_S \vec{q} dS = \int_S (-\lambda) \cdot \text{grad}\Theta dS$ - S je plocha, ve které tepelný tok počítáme - je to skalár (má pouze velikost) - jednotka (W) <p>Izotermy</p> <ul style="list-style-type: none"> - jsou to plochy se stejnou teplotou <p>Teplotní trubice</p> <ul style="list-style-type: none"> - obsahují konstantní tok tepla (konst. tepelný výkon)
--	---

[9]

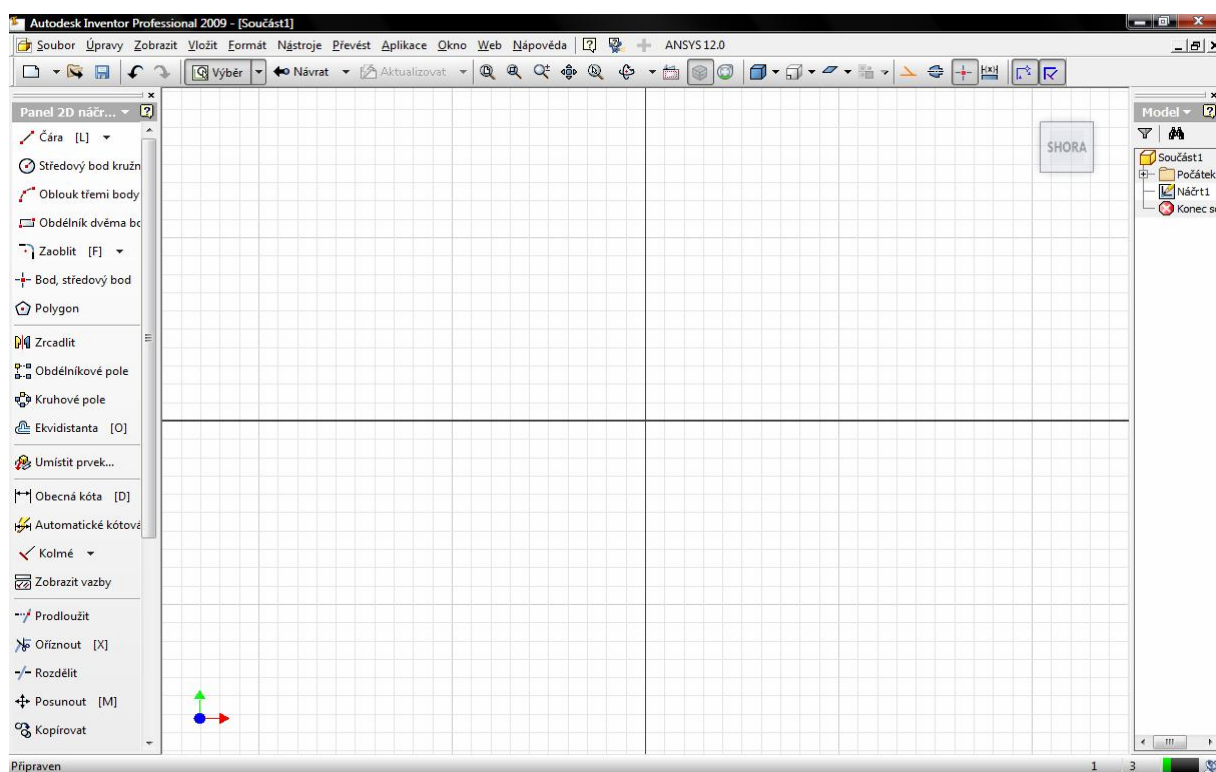
V kapitole jsem se zabýval otázkou přenosu tepla. V tomto oddílu jsou popsány jednotlivé druhy vedení tepelné energie a rovněž jsou zde uvedeny fyzikální zákony týkající se přenosu tepla. Problematika tepelných polí je velice složitá oblast. Ve většině reálných přenosů nemůžeme uvažovat pouze o jednom druhu přenosu tepelné energie, protože přenos tepla je vždy uskutečňován kombinací dvou nebo všech tří přenosů tepelné energie současně. Ve vlastní simulaci tepelného pole se omezím na simulaci přenosu tepla pomocí metody vedení tepla. Tudiž budu na vytvořeném modelu součásti polovodičového měniče simulovat jednotlivé ztrátové výkony a pomocí metody rozboru konečných prvků (FEA) v programu ANSYS zobrazovat tepelné pole v součásti.

2. Modely vybraných částí polovodičovým měničů

V kapitole se budu zabývat vytvořením 3D modelů součástí polovodičových měničů. Hlavně z důvodů tepelného pole a jeho tvorby mě bude zajímat blok polovodičových modulů a blok chlazení. V bloku polovodičových modulů vzniká ztrátový výkon, který je následně odváděn chladičem. Pro tvorbu modelů jsem vybral 3D program zvaný Inventor.

2.1 Inventor

Autodesk Inventor je program, který poskytuje komplexní a integrovanou sadu nástrojů pro navrhování a dokumentaci výrobků, které ověřují tvar, vhodnost a funkci návrhu. Model aplikace Inventor je přesný 3D digitální prototyp, který uživatelům umožňuje ověřovat při práci jejich návrhová a technická rozhodnutí. Potřebu vyrábět fyzické prototypy tak snižuje na minimum a zabráňuje nákladným změnám. [2]



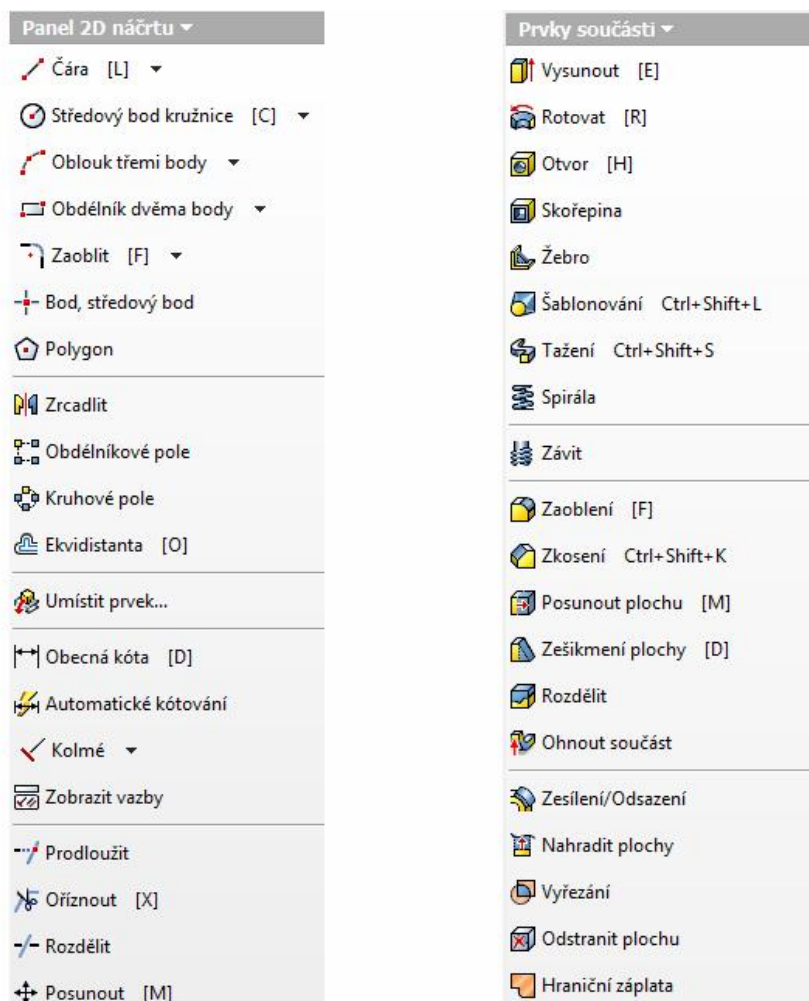
Obrázek č. 5: Prostředí Autocad Inventor

Softwarové produkty řady Autodesk Inventor kombinují intuitivní 3D návrhové prostředí pro vytváření součástí a sestav s nástroji pro funkční navrhování, které konstruktérům umožňují soustředit se na funkci návrhu a na jejím základě automaticky vytvářet inteligentní součásti jako ocelové rámy, stroje, vedení, potrubí, hadice, svazky elektrických kabelů a vodičů. Generování výrobní dokumentace z ověřeného 3D digitálního prototypu pomůže snížit množství chyb a souvisejících konstrukčních změn ještě před zahájením výroby. Inventor nabízí rychlý a přesný výstup výkresů připravených pro výrobu přímo na základě geometrie 3D modelu.

[2]

2.2 Konstrukce modelů

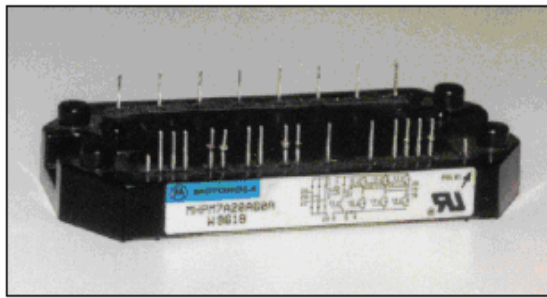
Při vytváření 3D modelu součásti se vychází z rozměrů uvedených výrobcem součásti v datasheetu nebo z reálného měření součásti. Realizace probíhá ve dvou fázích. V první fázi je návrh základní části součásti v 2D zobrazení v prostředí Náčrtu 2D. Po dokončení návrhu základu součásti se přepne pomocí vrchní listy Inventoru do prostředí Náčrtu 3D. V tomto prostředí se jednotlivé části mohou vysouvat, rotovat, vytvořit otvor, spirálu. Celý návrh součásti probíhá v šabloně zvané Norma.ipt. V obrázku uvádím pracovní prvky obou prostředí.



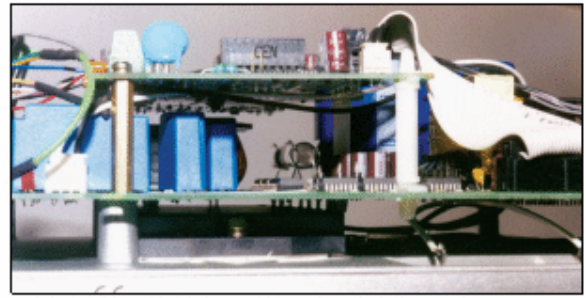
Obrázek č. 6: Pracovní nabídka panelů v Inventoru po Návrh 2D a Návrh 3D

2.3 Modely polovodičových modulů

Prvky polovodičových součástí (GTO, IGBT, IGCT) se dodávají v provedení bezpotenciálových modulů. Až v poslední době se u některých výrobců připravuje výroba pastilkových pouzder těchto součástí. Uvedené řešení však zatím není obvyklé, a proto bude dále věnována pozornost pouze bezpotenciálovým modulům. Výhodou tohoto řešení je bezpotenciálový styk modulu s chladičem, kompaktnost a možnost dosáhnout velké integrace obvodů a součástek v jednom modulu.



Obrázek č. 7: Výkonový modul pro měnič frekvence pro motor 1,5 kW



Obrázek č. 8: Umístění výkonového modulu na chladič s připojenou řídicí elektronikou

2.3.1 Usměrňovač SKD50/08/A3 v provedení SEMIPONT

Usměrňovač SKD50/08/A3 v provedení SEMIPONT (celý můstek v jednom modulu) od firmy Semicon. Základní rozměrové parametry jsou převzaty z katalogového listu z internetových stránek výrobce. Uvedené rozměry jsou v milimetrech.

Tento modul má následující parametry:

$$U_{RRM}, U_{RMS} = 800 \text{ V}$$

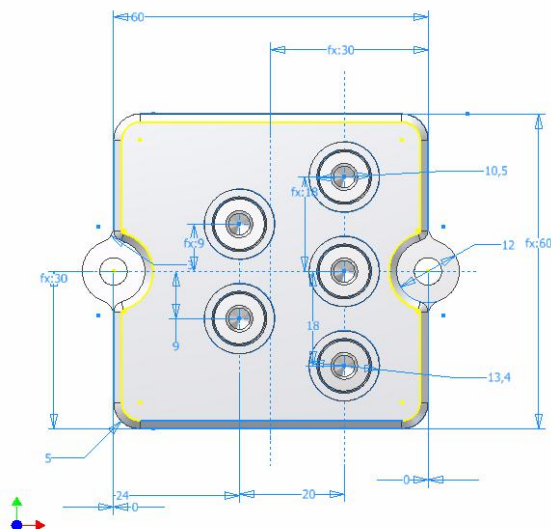
$$I_D = 50 \text{ A}$$

$$R_{th(J-C)} = 0,45 \text{ K/W}$$

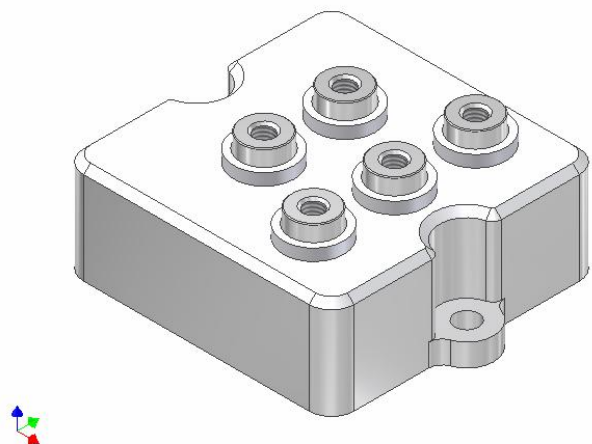
$$R_{th(C-H)} = 0,06 \text{ K/W}$$

$$T_{Jmax} = 150 \text{ °C}$$

$$I^2t = 1800 \text{ A}^2\text{s}$$



Obrázek č. 9: Náčrt modul usměrňovače SKD50/08/A3 s kótami



Obrázek č. 10: 3D modul usměrňovače SKD50/08/A3

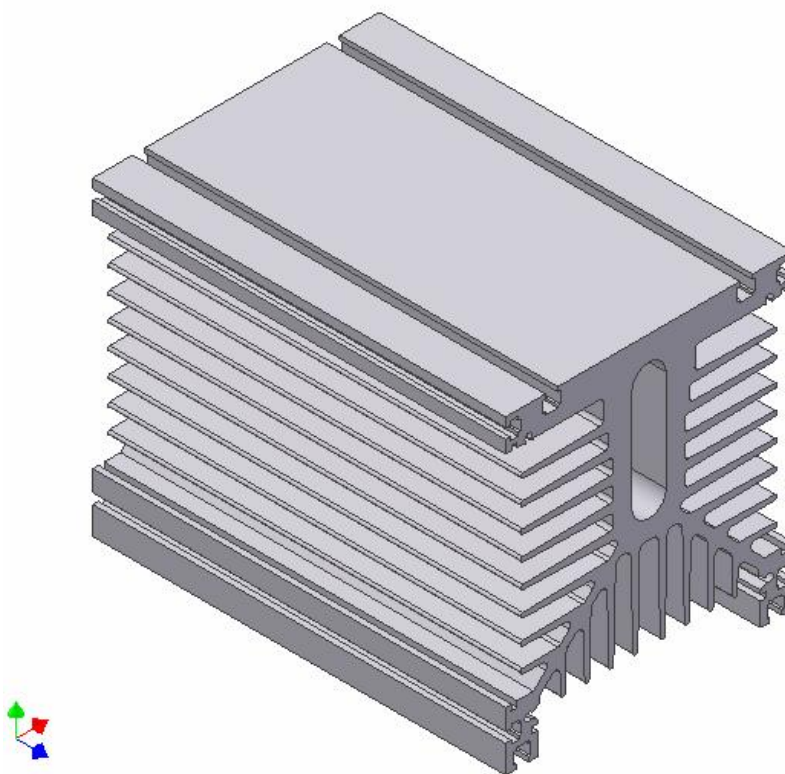
2.4 Modely chladičů

Pro bezpotenciální moduly polovodičových součástí jsem vybral vzduchové profilové chladiče, vyráběné ze slitin hliníku. Jejich povrch může být anodicky oksidován. Lze je použít pro přirozené i nucené chlazení. Při nuceném chlazení je chladič opatřen ventilátorem a chladícím tunelem.

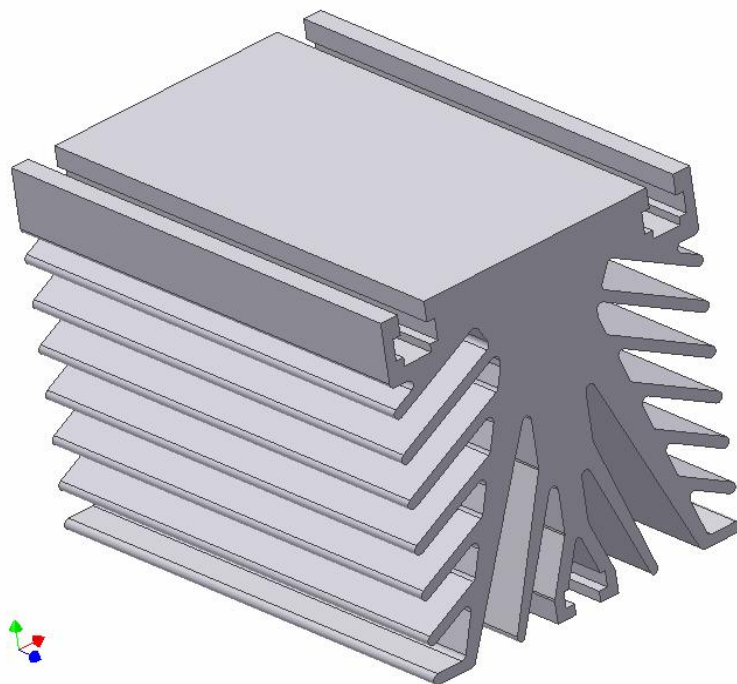
Praktická poučka pro přirozené chlazení říká, že drážka chladiče je účinná jen do hloubky, která se přibližně rovná její šířce. U hlubokých drážek je proudění vzduchu bržděno tak, že se hlubší části drážek na výsledné účinnosti chladiče prakticky nepodílejí. Proto by pro přirozené chlazení měly být výhodnější chladiče se širokými drážkami. Z porovnání chladičů podle údajů katalogu plyne, že vliv tohoto pravidla je zřejmý, ale snížení účinnosti se uplatní až při větší délce chladiče. U krátkých chladičů s hlubokými drážkami, se dosahuje nižšího výsledného tepelného odporu. Takové chladiče zabírají větší objem, ale menší plochu.

Pro připevnění modulů k chladiči se využívají tepelně vodivé kontaktní vazelíny na bázi silikonových olejů s obsahem kyslíčnicků kovů, nebo speciálních kontaktních vložek. Mechanické připevnění chladičů do sestav a elektrické připojení se provádí využitím příslušných drážek a otvorů v chladičích, které se opatří vhodným spojovacím materiálem, buď standardním, nebo z nabídky výrobce chladičů.

[3]

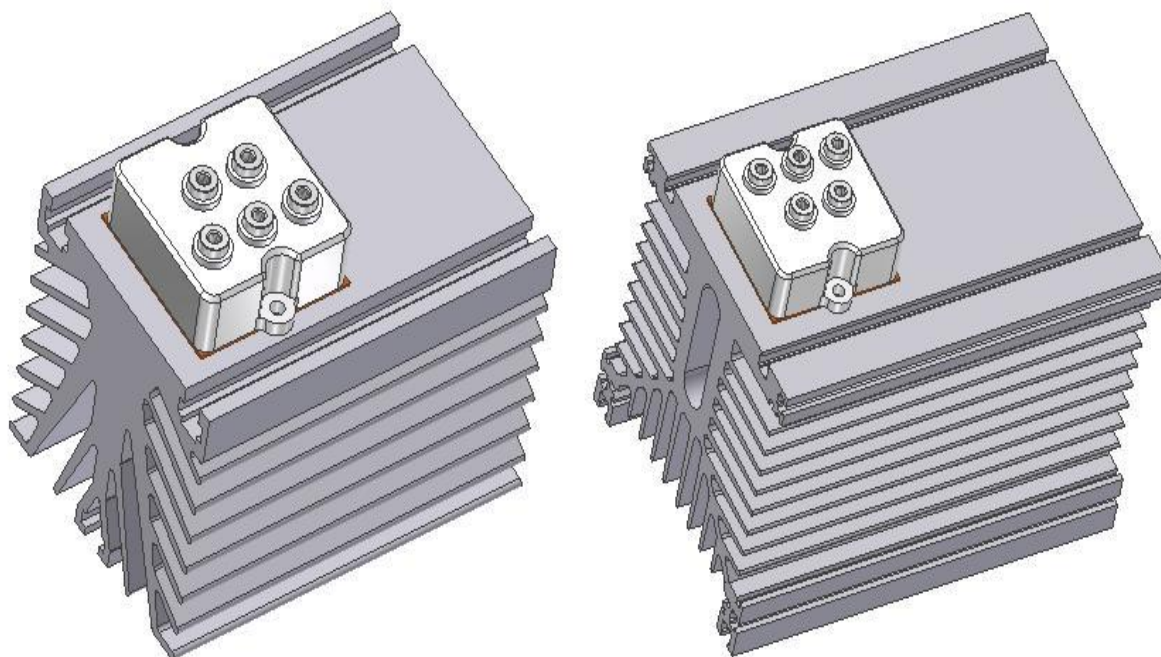


Obrázek č. 13: Model profilového typu chladiče P3 od firmy Semicron

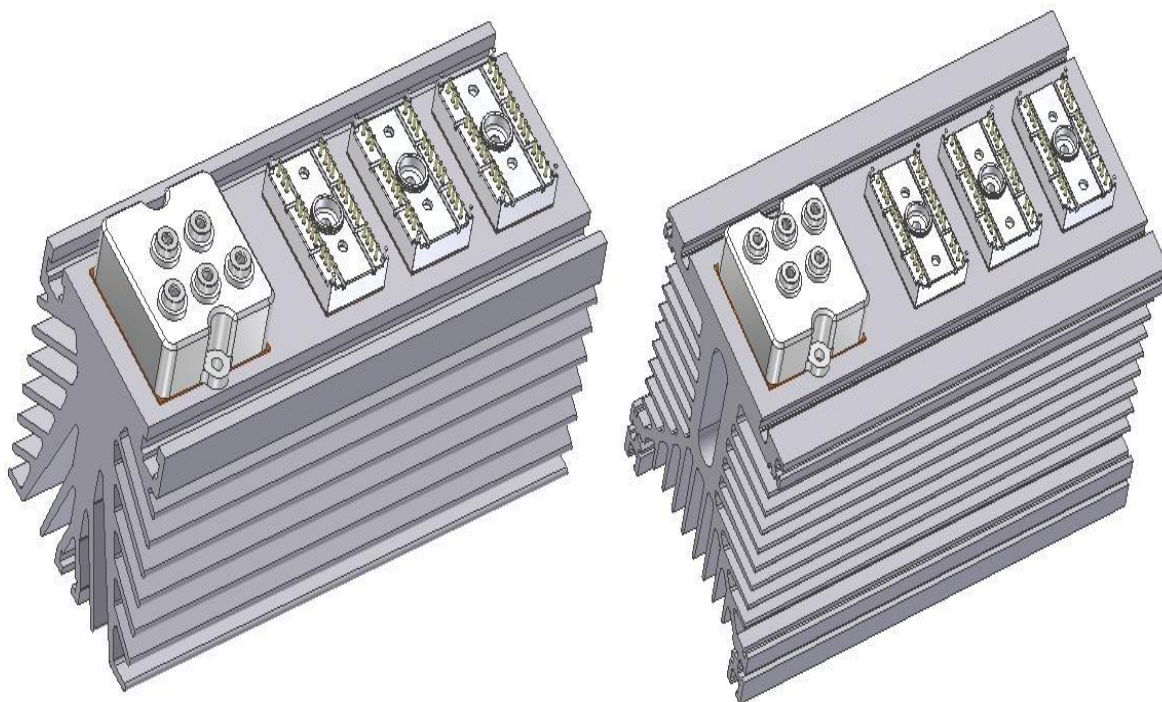


Obrázek č. 14: Model profilového typu chladiče L140 od firmy Polovodiče a.s.

Pro simulaci tepelných polí jsem se rozhodl využít dva druhy chladičů. Celkově jsem si připravil čtyři sestavy složené z jednotlivých modelů komponent. Dvě sestavy jsou uskutečněny pomocí polovodičového modulu SKD50/08/A3 umístěného na chladiči P3 a chladiči L140. Na zbylé dvě sestavy jsem využil modulu SKD50/08/A3 a tří modulů SK60GB125 umístěných na chladičích. Mezi moduly a chladičem je vytvořena vrstva, které má simulovat použitou kontaktní vazelinu. Zobrazené modely jsou informativní, v rámci simulací nebudou zobrazovány bezpotenciálové moduly.



Obrázek č. 15: Modely chladičů s modulem SKD50/08/A3



Obrázek č. 16: Modely chladičů s modulem SKD50/08/A3 a třemi moduly SK60GB125

Při provozu výkonových polovodičových součástek se uplatňují zejména ztráty v propustném směru a ztráty spínací. Ztráty v propustném směru závisí na prahovém napětí, diferenciálním odporu a na velikosti proudu protékajícím součástkou.

Energetická účinnost výkonových polovodičových měničů je úzce spjata s použitými výkonovými prvky měniče a možnostmi chlazení měniče. Ztrátový výkon měniče (resp. součástky) závisí na přípustné teplotě součástky, na schopnosti součástky odvádět teplo T_j z přechodu do okolního prostředí, na teplotě okolního prostředí T_c a na časovém průběhu elektrického zatížení součástky. Souvislost mezi maximálním ztrátovým výkonem součástky a teplotou lze vyjádřit rovnicí (1.26), kde R_{thjc} je tepelný odpor prvku.

$$\Delta P_L = \frac{\max(T_j) - T_c}{R_{thjc}} \quad (2.1)$$

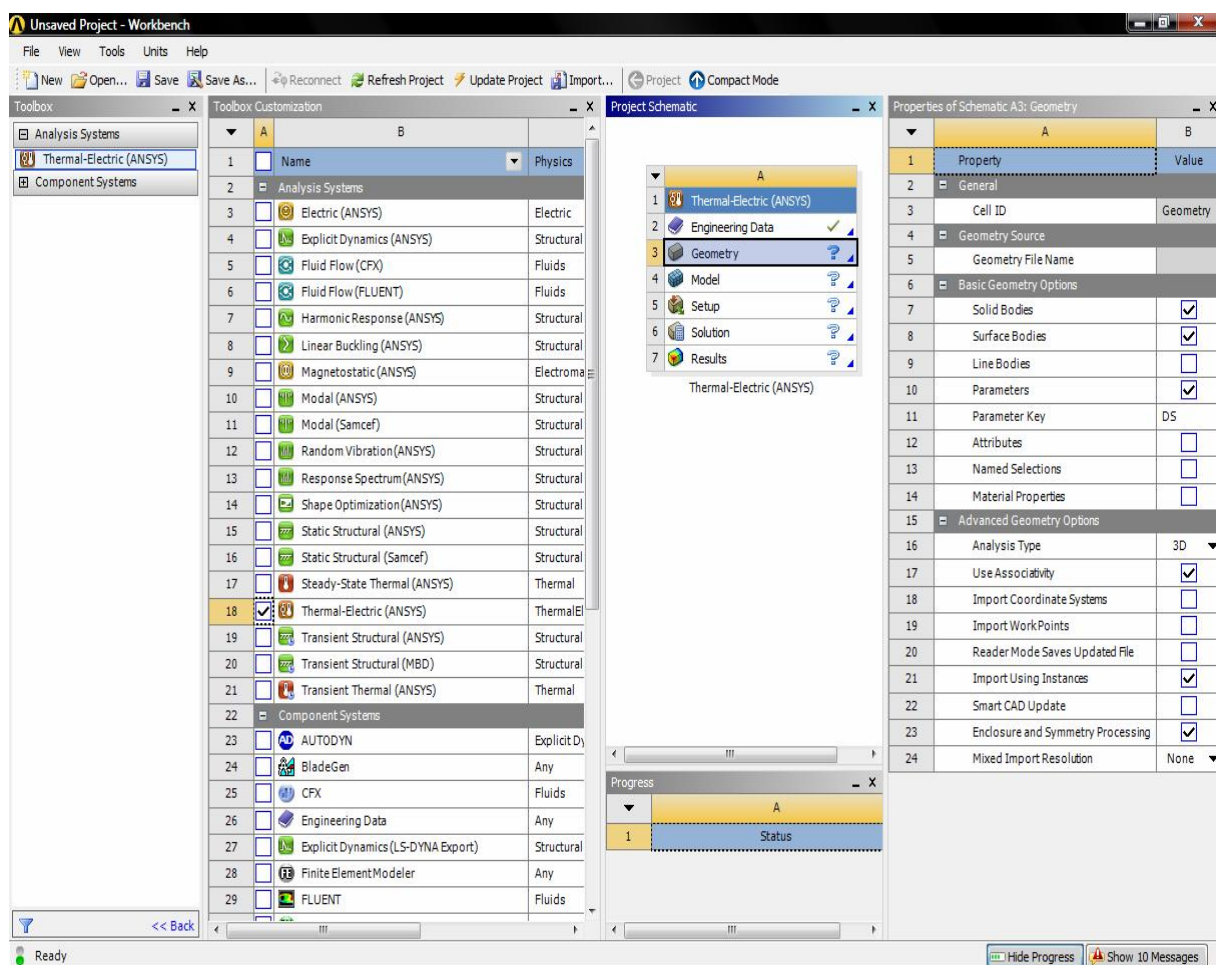
Mezní ztrátový výkon se pak určí výpočtem z maximální mezní přípustné hodnoty teploty přechodu T_j , při které je zaručena ještě správná funkce součástky. Parametry R_{thjc} a $\max(T_j)$ jsou dány výrobcem.

[4]

3. Simulace rozložení tepelných polí

Na simulaci teplotních polí jsem zvolil program Ansys, konkrétně verzi Ansys Workbench 12.1. Ansys je univerzální a aktualizovaný výpočetní program, který využívá metodu rozboru konečných prvků (FEA). Rozbor konečných prvků je numerická metoda dekonstrukce celého systému na velmi malé části (definované velikosti) tzv. elementy. Software realizuje rovnice, které řídí chování těchto elementů a řeší je všechny a vytvoří náhled na chování celé soustavy. Výsledky řešení soustavy jsou zobrazovány formou obrázku nebo tabulkou. Analýza pomocí elementů se využívá pro návrh a optimalizaci složitých systémů. [5]

Ansys je standardní FEA výukový nástroj pro vysoké školy. Program nachází využití také v praxi v oblastech jako je elektrotechnika, fyzika a chemie.



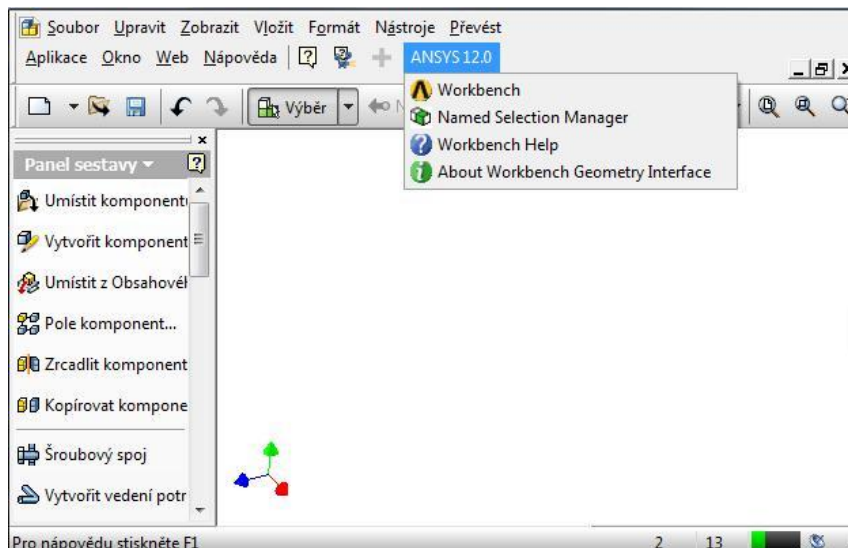
Obrázek č. 17: Prostředí Ansys Workbench

Ansys Workbench poskytuje způsob, jak prozkoumat souhrn vlastností produktů nebo procesů ve virtuálním prostředí. Pomocí virtuálního modelu může uživatel opakovat různé druhy optimalizace a přizpůsobit produkt před začátkem výroby. To výrazně snižuje úroveň rizika i finanční náklady. Multifunkční povaha Ansysu poskytuje náhled na chování produktu z hlediska elektromagnetického, tepelného, mechanického atd. působení.

[5]

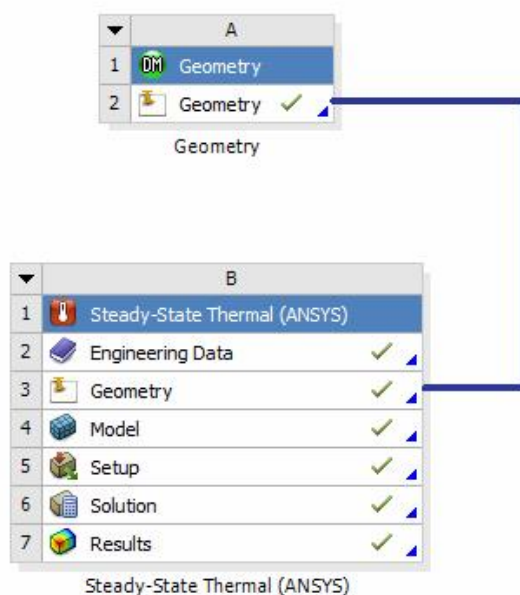
3.1 Import 3D modelů a nastavení parametrů

Výhodou pro uživatele v prostředí Ansys Workbench je možnost speciálního podpory, která umožňuje import geometrie z jiných prostředí. Podporovaná prostředí jsou Autocad Inventor, Catia, SolidWorks nebo Pro/Engineer. Této podpory jsem využil i při mé simulaci. 3D modely pomocí záložky v Autocad Inventor jsem přesunul do prostředí Ansys Workbench, nabídka importování 3D modelu z prostředí Autocad Inventor do prostředí Ansys je zachycena na obrázku číslo 18.



Obrázek č. 18: Podpora importu 3D modelu do programu Ansys

Po provedení importu se spustí prostředí Ansys Workbench zobrazené na obrázku 17. V panelu Toolbox Customization jsem vybral patřičný systém pro analýzu problému. Pro simulaci tepelných polí jsem zvolil Thermal analýzu. Po vybrání analýzy se zobrazí panel zobrazený na obrázku číslo 19.



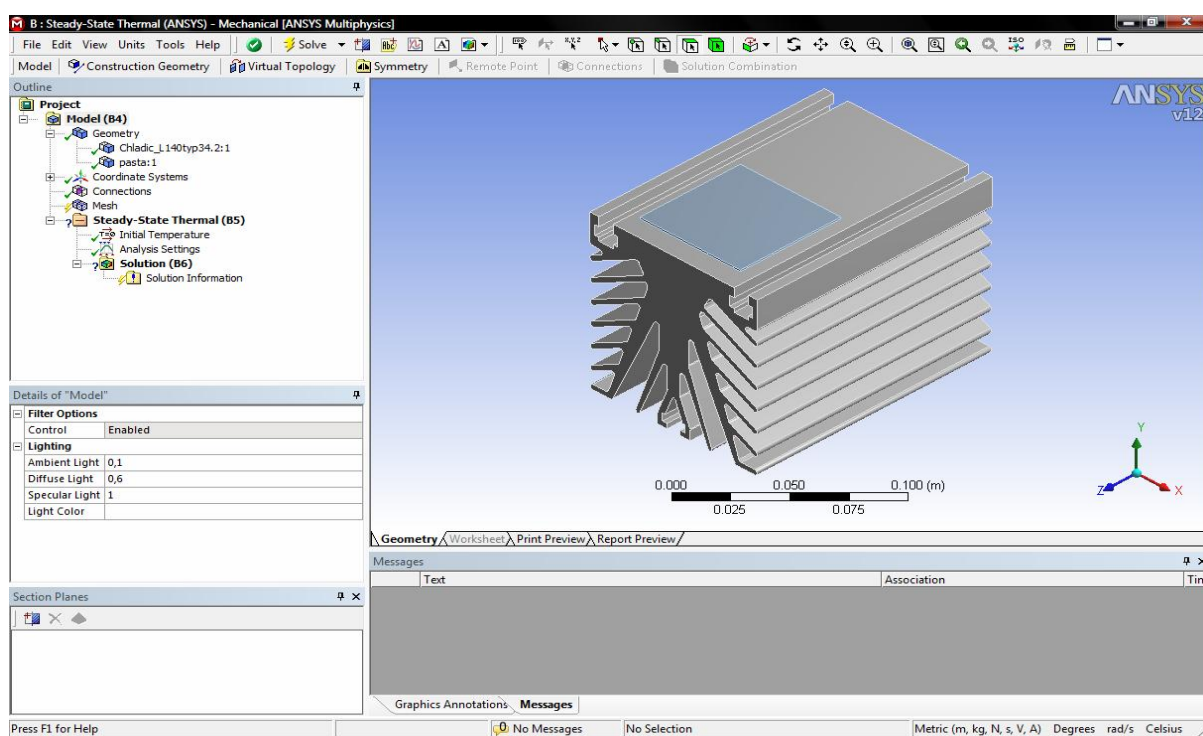
Obrázek č. 19: Nastavení parametrů modelu v prostředí Ansys

Ikona Geometry umožňuje spuštění části Ansysu s názvem Design Modeler. Design Modeler složí k 3D kreslení ve výpočtové oblasti. Kromě kreslení 3D modelů umožňuje import nakreslené geometrie z jiných prostředí. Podporovaná prostředí jsou Autocad Inventor, Catia, SolidWorks nebo Pro/Engineer. [5]

Ikona Engineering Data spouští nabídku nastavení materiálu jednotlivých součástí, ale může být využita i nainstalovaná podpora a materiálové vlastnosti se mohou importovat a zachovat z jiného prostředí, jako je například Autocad Inventor.

Ikona Model slouží k zobrazení modelu určeného pro simulaci, ale zároveň zabezpečuje možnost aktualizace modelu při změně konstrukce v prostředí, kde byl model sestaven.

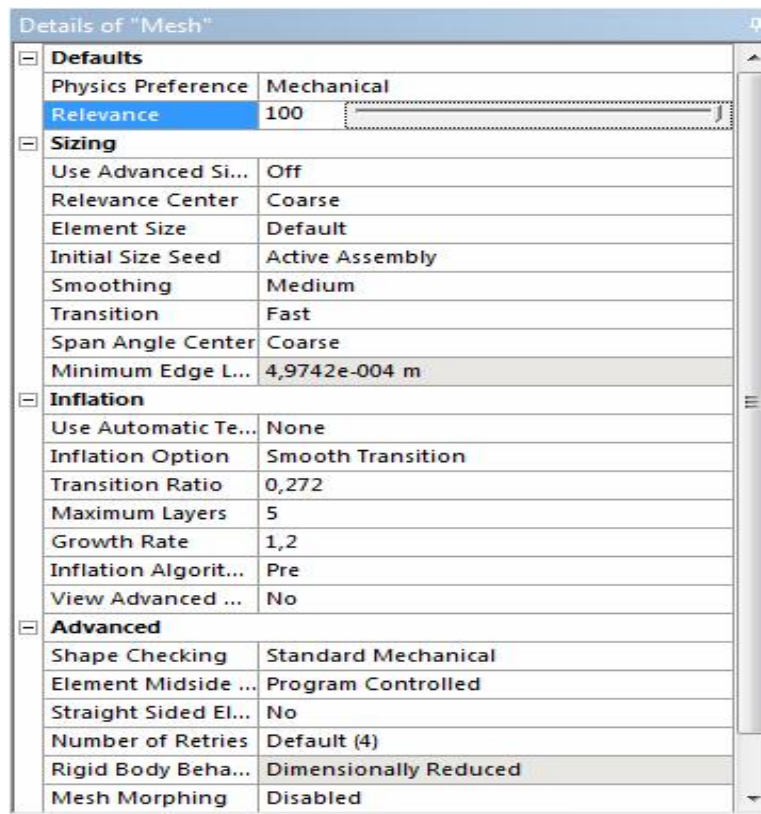
Po provedení všech nastavení a aktualizaci modelu je možné pomocí nabídky Setup spustit vlastní simulační prostředí nazvané Mechanical. Po spuštění se objeví plocha vyobrazená na obrázku číslo 20.



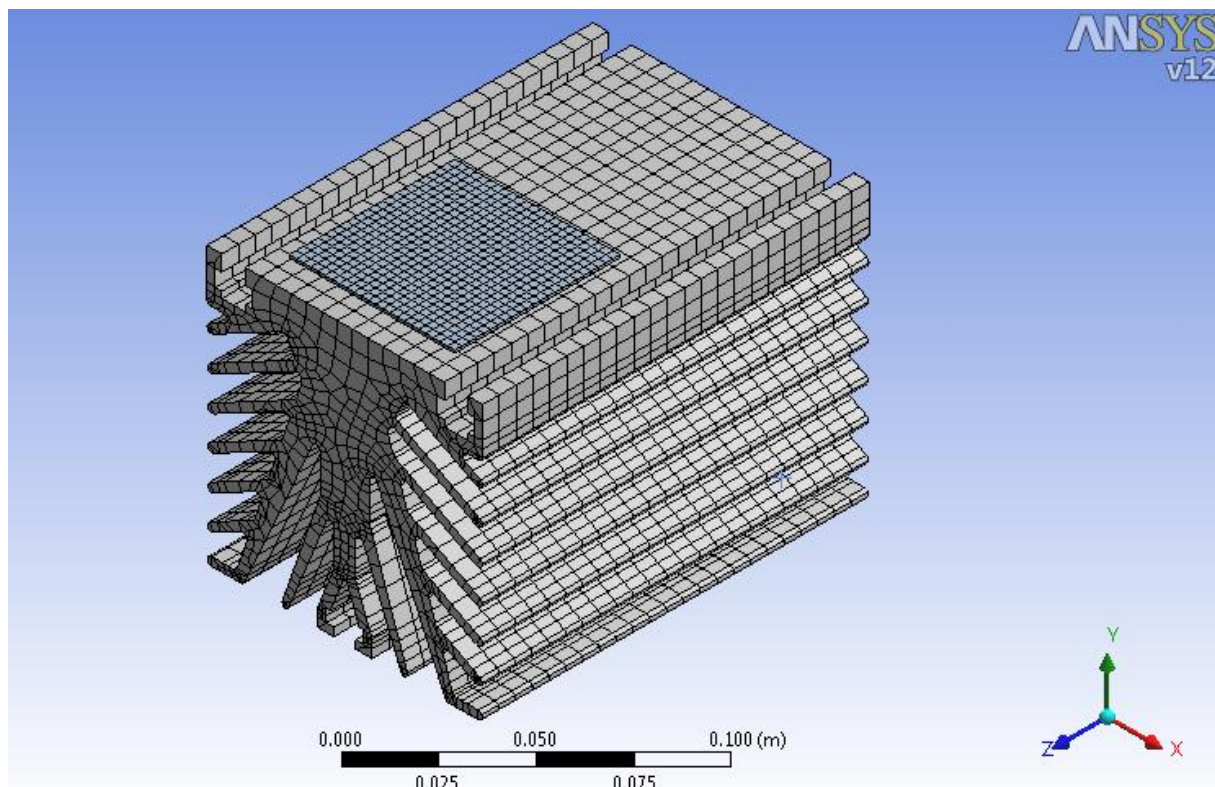
Obrázek č. 20: Prostředí Mechanical programu Ansys

Prostředí Mechanical zobrazuje pohled na model, na kterém bude simulace probíhat. Pokud je model složený z několika částí, je možné jednotlivé díly dle potřeby skrývat. Prostředí Mechanical dále umožňuje zobrazení základních os geometrie a vytvoření přídatných os, které mohou být nápomocny ve vlastní simulaci.

Položka Mesh určuje výpočetní síť. Je to jeden z hlavních kroků při provádění výpočtů pomocí metody konečných prvků. Hustota výpočetní sítě dominantně ovlivňuje následnou simulaci a její výsledek. Kvůli co nejpřesvědčivějším výsledkům je třeba nastavit parametr Relevance na maximum. Zároveň musí být přihlédnuto k složitosti celého 3D modelu a k parametrům počítače, na kterém je simulace prováděna (velikost operační paměti, předpokládaná doba výpočtu), a pak dochází k rozhodnutí, zda bude ještě možné nastavit nejmenší hodnotu velikosti základního elementu výpočetní sítě. Na obrázku číslo 22. je zobrazena výpočetní síť pro model chladiče s jedním modulem.



Obrázek č. 21: Nastavení výpočetní sítě



Obrázek č. 22: Výpočetní sítě modelu chladiče s uvažovaným jedním modulem

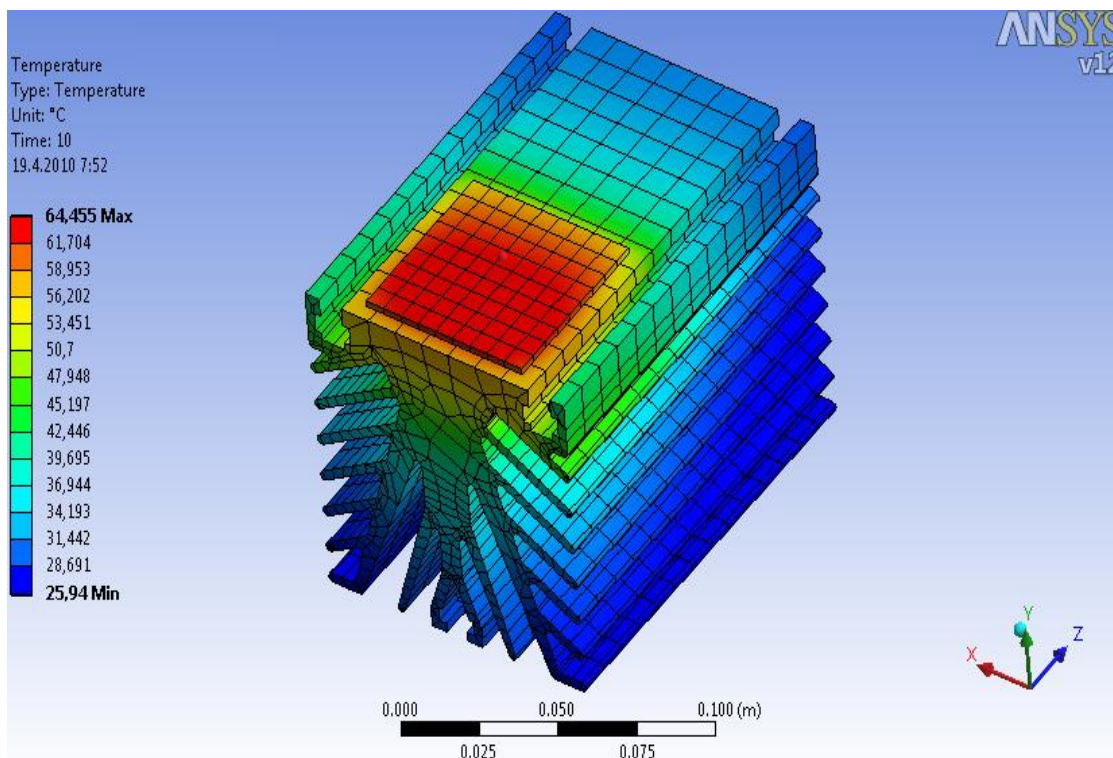
3.2 Simulace tepelného pole

Po nastavení a tvorbě výpočetní sítě, je možné následně přistoupit k nastavení vlastní simulace. První z kroků je nastavení doby simulace a počtu jednotlivých mezikroků výpočtu. Další je nastavení vztažné hodnoty teploty. Pro mé simulace jsem nastavil hodnotu vztažné teploty na hodnotu 22 °C, dobu simulace na 1 sekundu a počet mezikroků na 10. Po splnění těchto základních nastavení jsem provedl definici jednotlivých zatížení, určení plochy, na které předpokládám ztrátový výkon, a nastavení tepelného vedení modelu chladiče. Po provedení nastavení jsem se přesunul do položky Solution, kde jsem vybral druh zobrazení výsledků simulace jako Temperature. Další možností je zobrazení detailů přechodu mezi jednotlivými vrstvami, to nám umožní Reaction Probe.

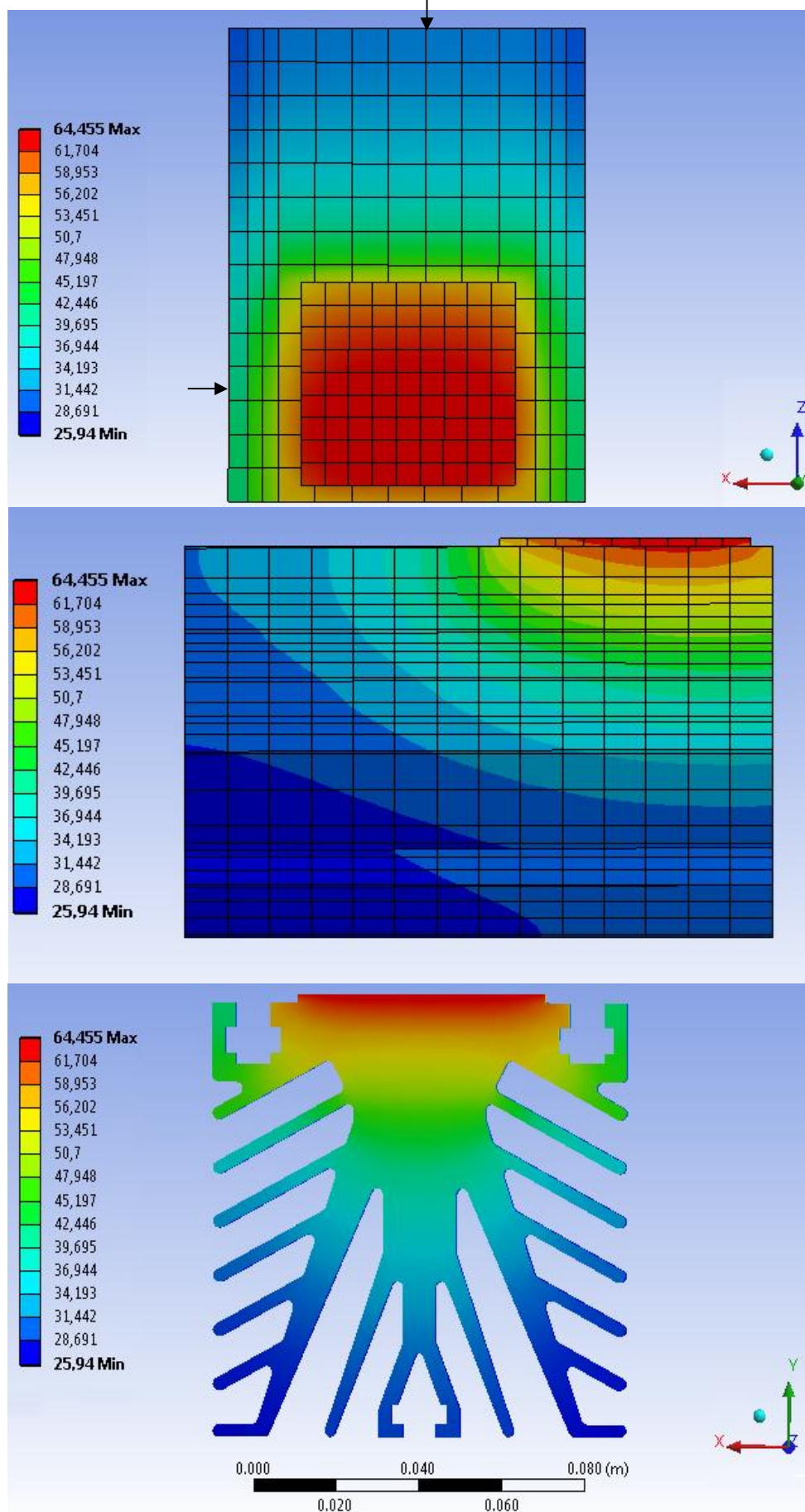
První simulaci jsem provedl na chladiči L140 od firmy Semicon s předpokládaným modulem SKD50/08/A3. Z důvodů neznalosti vlastní vnitřní konstrukce není bezpotenciálový modul součástí simulace. Modul SKD50/08/A3 je předpokládán i u druhé simulace, ale s využitím chladiče P3 od firmy Polovodiče a.s.

3.2.1 Simulace teplotního pole na chladiči L140 se ztrátovým výkonem 100W, 300W, 500W

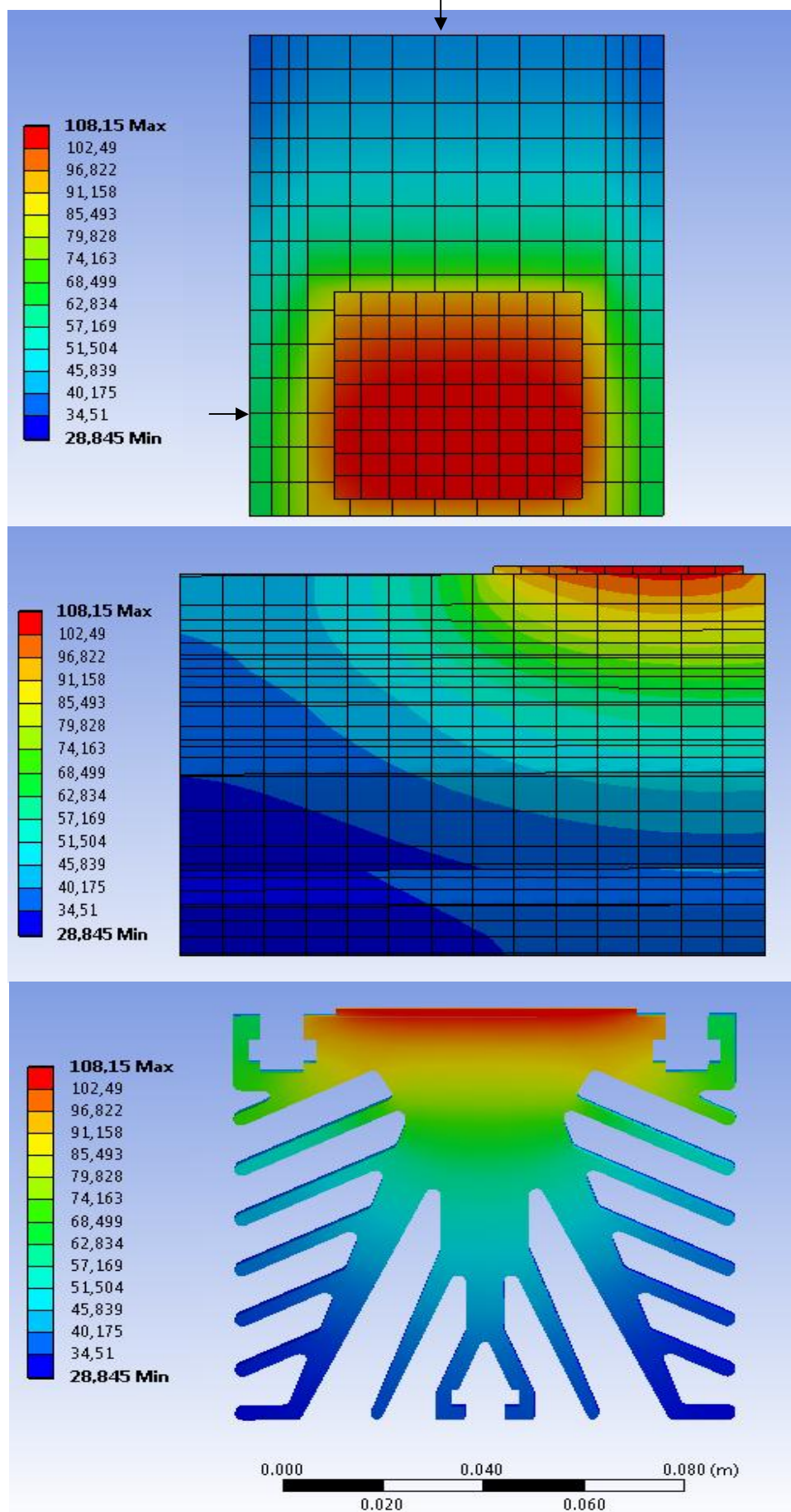
Na obrázcích jsem zachytil vypočtené tepelné pole při simulaci ztrátového výkonu na spodní část kontaktní vazelíny. Definovaná velikost mesh relevace je 100 a velikost elementu výpočetní sítě je 4,9 mm. Délka chladiče je 140 mm a uvažovaná plocha, na které jsem simuloval ztrátový výkon, odpovídá spodním rozměrům modulu SKD50/08/A3.



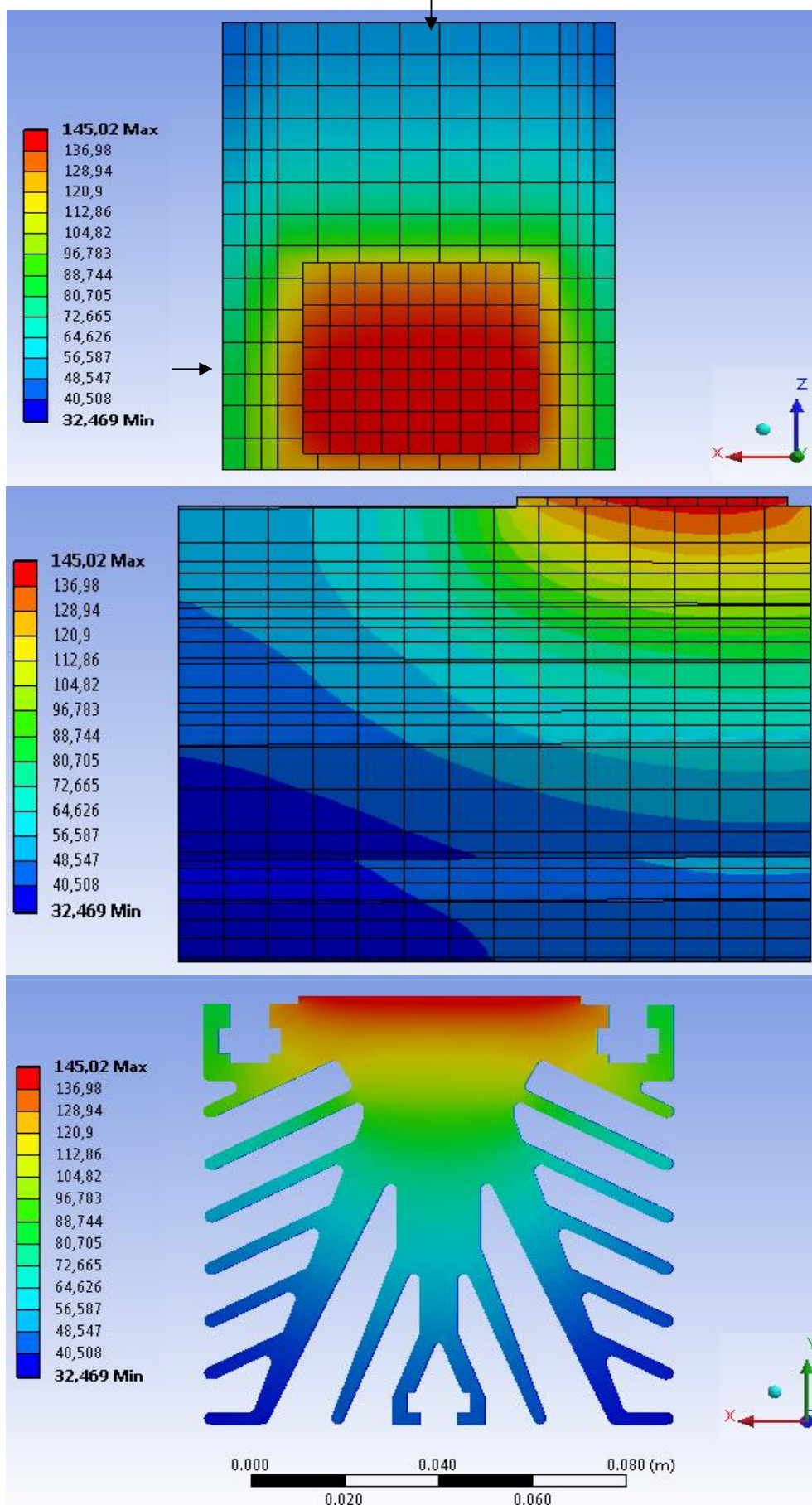
Obrázek č. 23: Teplotní pole chladiče L140



Obrázek č.24: Simulace tepelného pole na chladiči L140 (ztrátový výkon 100W)



Obrázek č.25: Simulace tepelného pole na chladiči L140 (ztrátový výkon 300W)

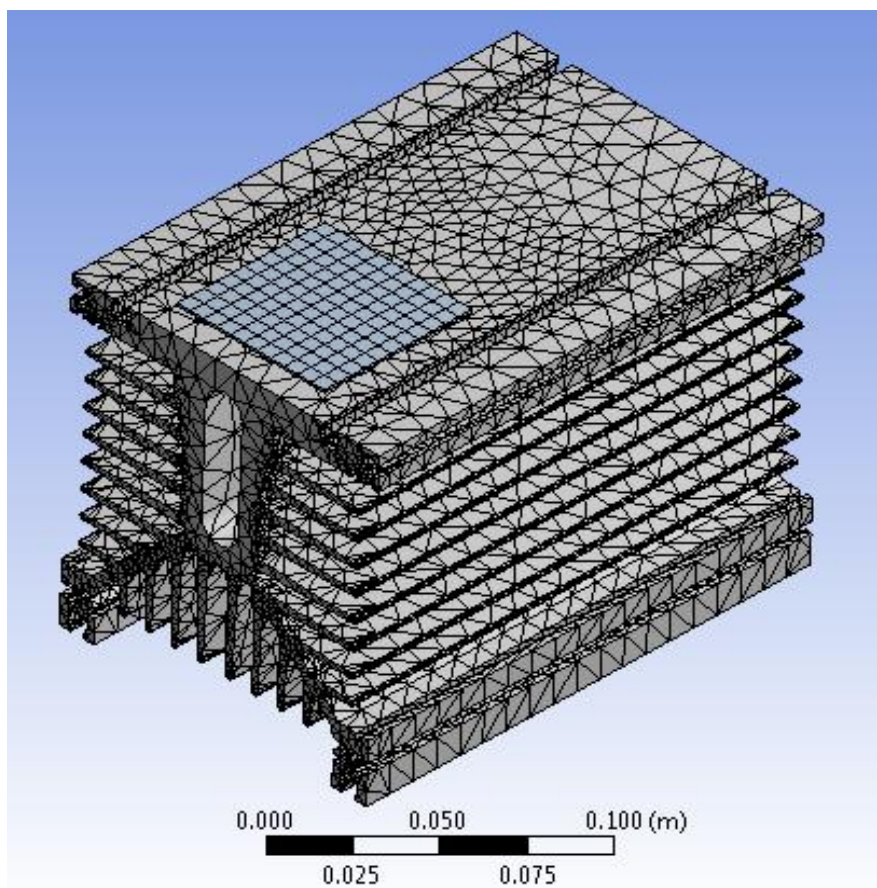


Obrázek č.26: Simulace tepelného pole na chladiči L140 (ztrátový výkon 500W)

Simulaci tepelného pole na chladiči jsem rozšířil o více simulací s využitím stejného chladiče, ale při různém ztrátovém výkonu. Na obrázku číslo 25 je simulován ztrátový výkon 300W. Maximální hodnota teploty se zvýšila na hodnotu 101 °C. U obrázku číslo 26 se teplota zvýšila na hodnotu 145 °C. Chladič je plně tepelně využit. Tepelné pole vytvořené na vrchní straně chladiče prochází chladičem až ke spodní části.

3.2.2 Simulace teplotního pole na chladiči P3 se ztrátovým výkonem 100W, 300W, 500W

Simulace tepelného pole na chladiči P3 se ztrátovým výkonem 100W, 300W, 500W byla provedena ke srovnání jednotlivých tepelných polí a vzhledem ke konstrukci chladičů. Velikost plochy, na kterou byl ztrátový výkon simulován, opět odpovídá velikosti modulu SKD50/08/A3. Vzdálenost umístění plochy od okraje chladiče je 10 mm, stejná vzdálenost byla použita i u simulace s chladičem typu L140.

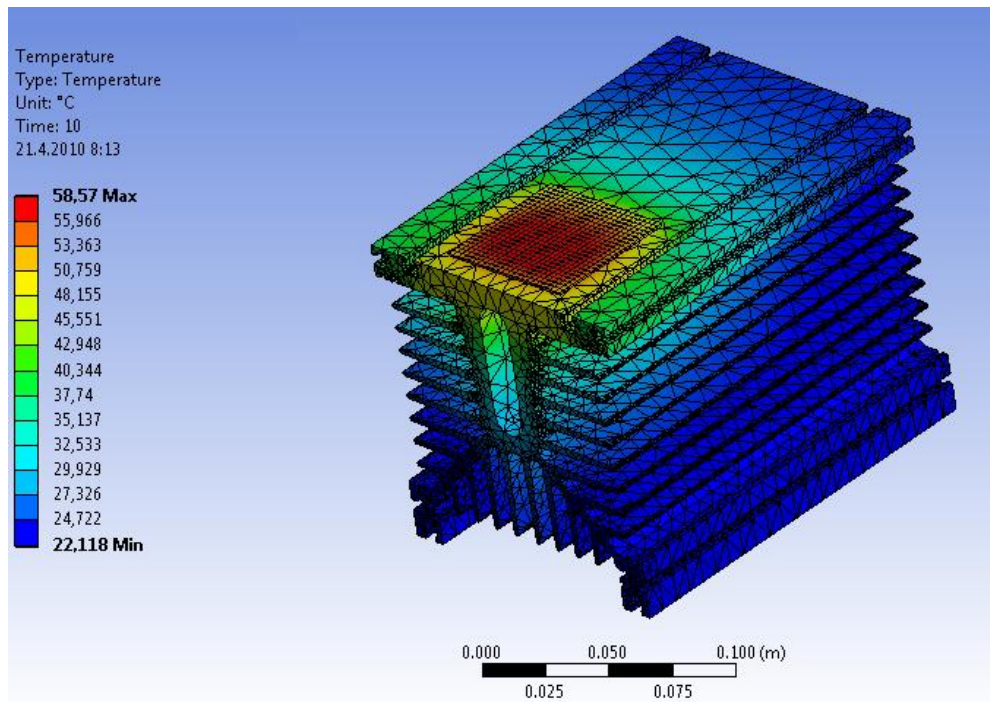


Obrázek č. 27: Vytvořený výpočetní síť

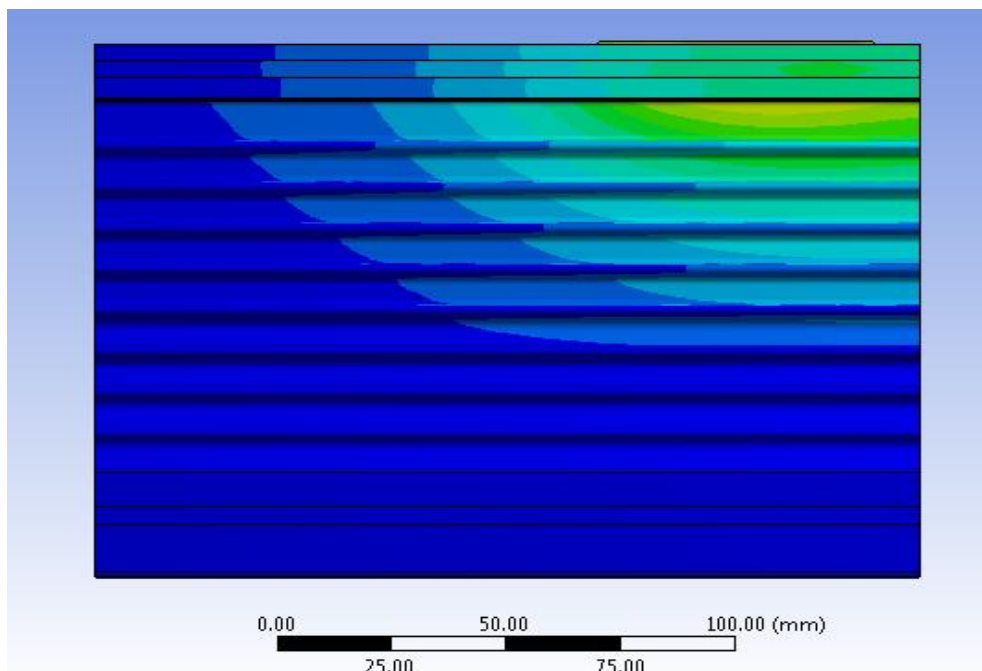
Při praktické realizaci tohoto modelu se vyskytly problémy s vytvořením tepelného pole pomocí vedení. Tento druh chladiče je díky své konstrukci použitelný pro nucené chlazení. Na chladiči je připevněn ventilátor, který vhání vzduch do středové díry chladiče. Jelikož jsem se rozhodl, že tepelné pole budu simulovat pouze za účelem vedení tepla, musel jsem konstrukci chladiče upravit tak, aby splňovala podmínky pro simulaci. Úpravu chladiče jsem mohl provést dvojím způsobem. První způsob je jednoduchý a spočívá v odstranění vnitřního otvoru chladiče. Druhý způsob je

náročnější a spočívá ve vytvoření modelu vnitřní díry chladiče. Při sestavování modelu se tato součást umístí do chladiče. Při definici simulace by se tento komponent modelu musel případně nastavit, aby symbolizoval oblast, ve které neprobíhá vedení tepla.

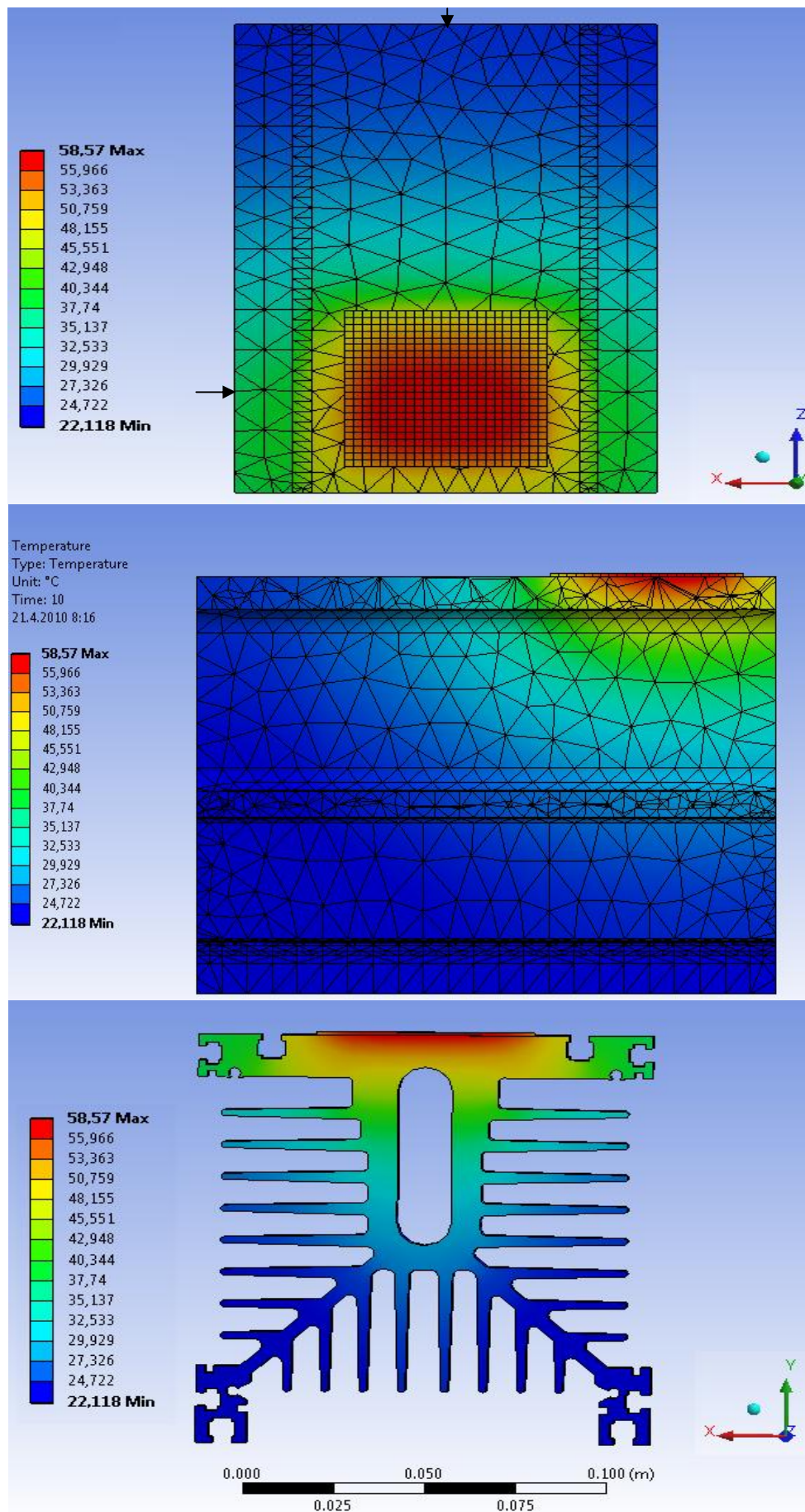
Pro simulaci modelu jsem provedl úpravu vyplněním středního otvoru součásti materiálem, který nebude přenášet žádným způsobem tepelnou energii.



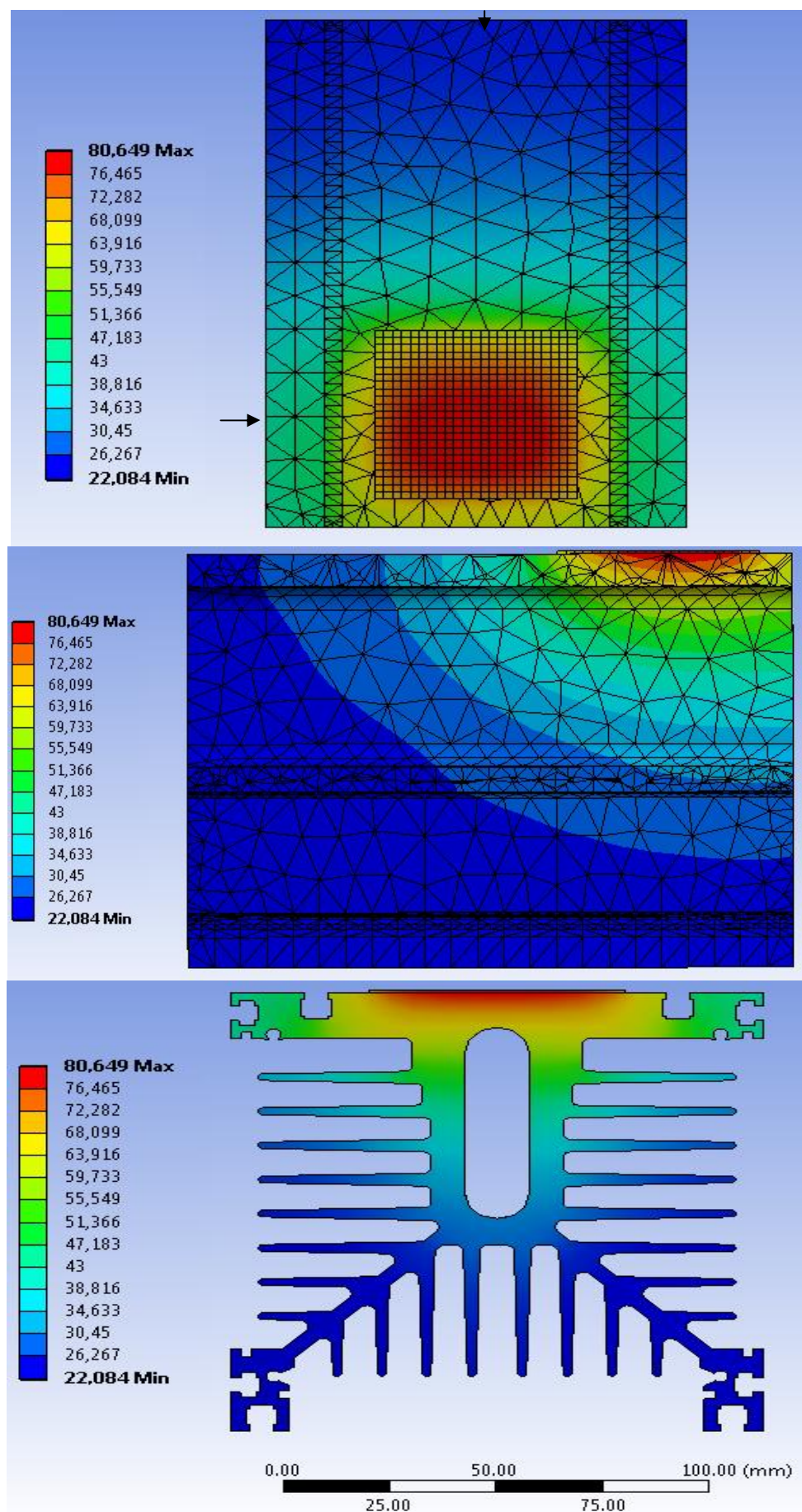
Obrázek č. 28: Teplotní pole chladiče P3



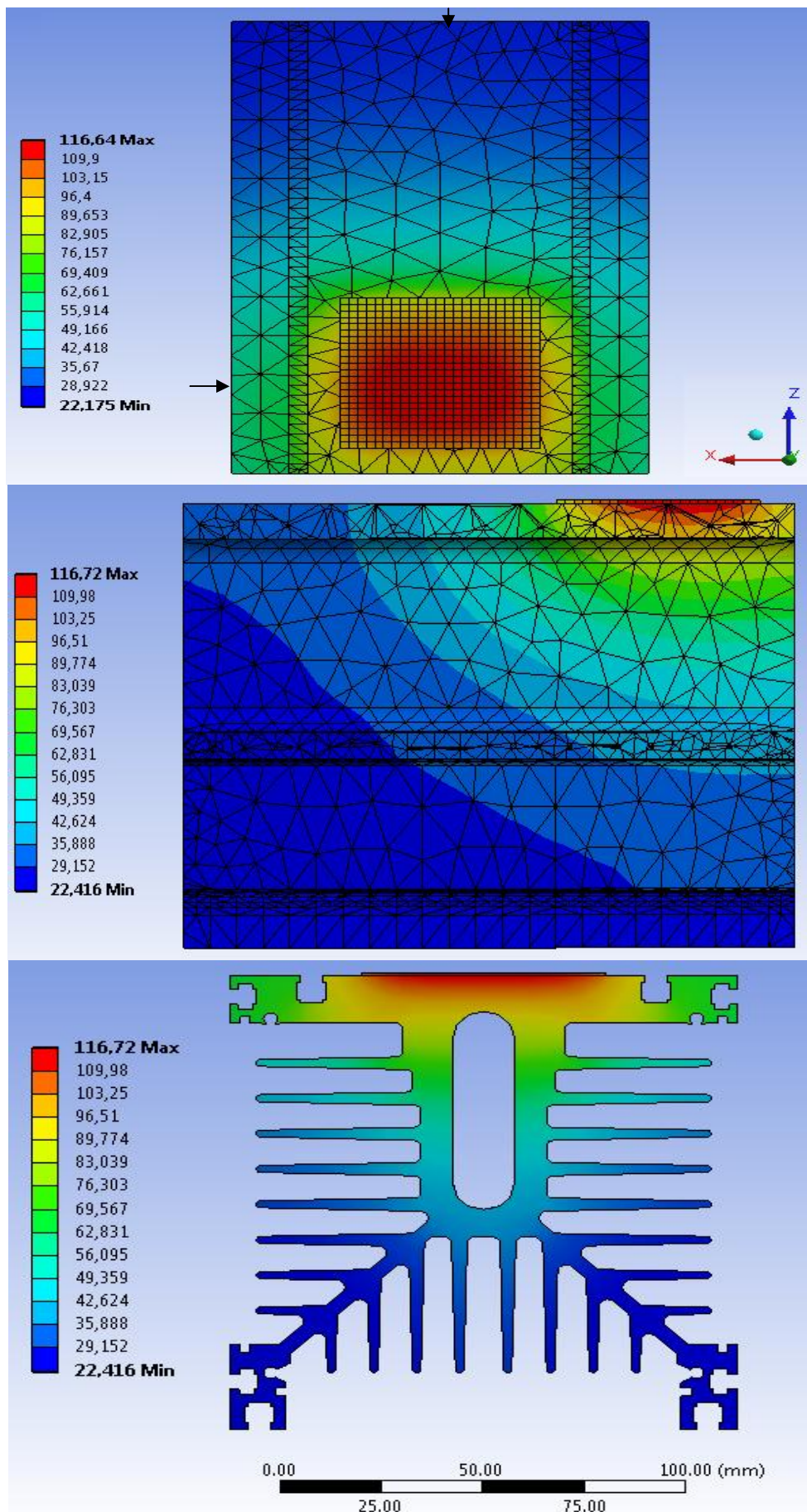
Obrázek č.29: Boční pohled na teplotním polem (zatížení 100W)



Obrázek č.30: Simulace tepelného pole na chladiči P3 (ztrátový výkon 100W)



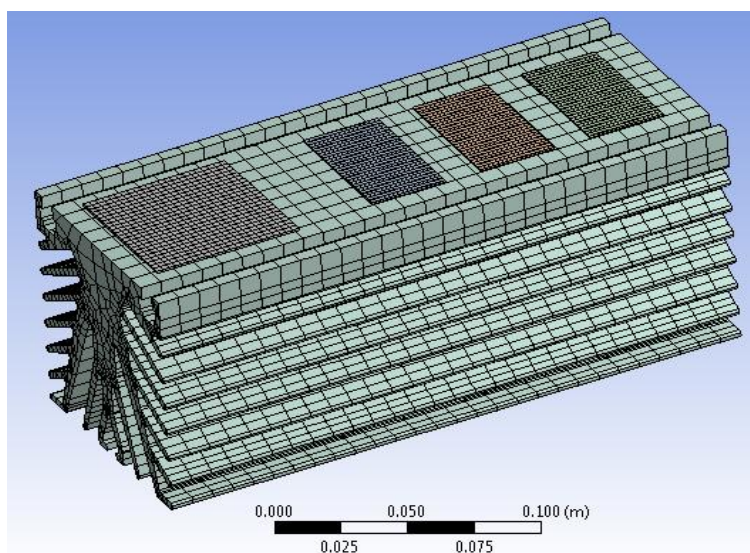
Obrázek č.31: Simulace tepelného pole na chladiči P3 (ztrátový výkon 300W)



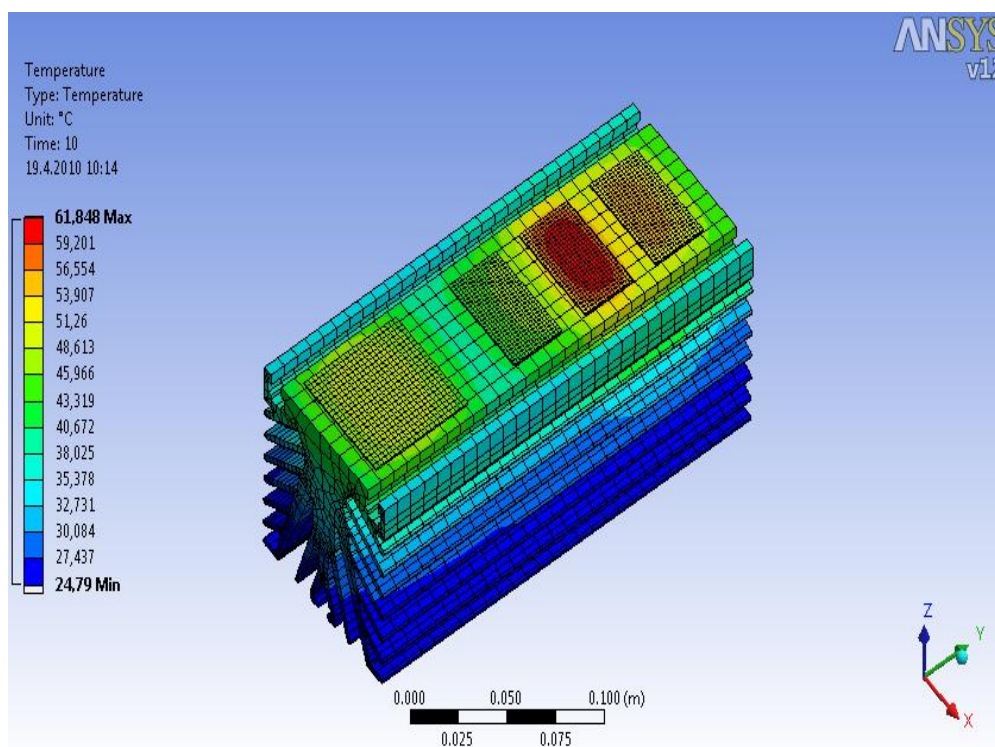
Obrázek č.32: Simulace tepelného pole na chladiči P3 (ztrátový výkon 500W)

3.2.3 Simulace teplotního pole na chladiči L140 se ztrátovým výkonem 350W

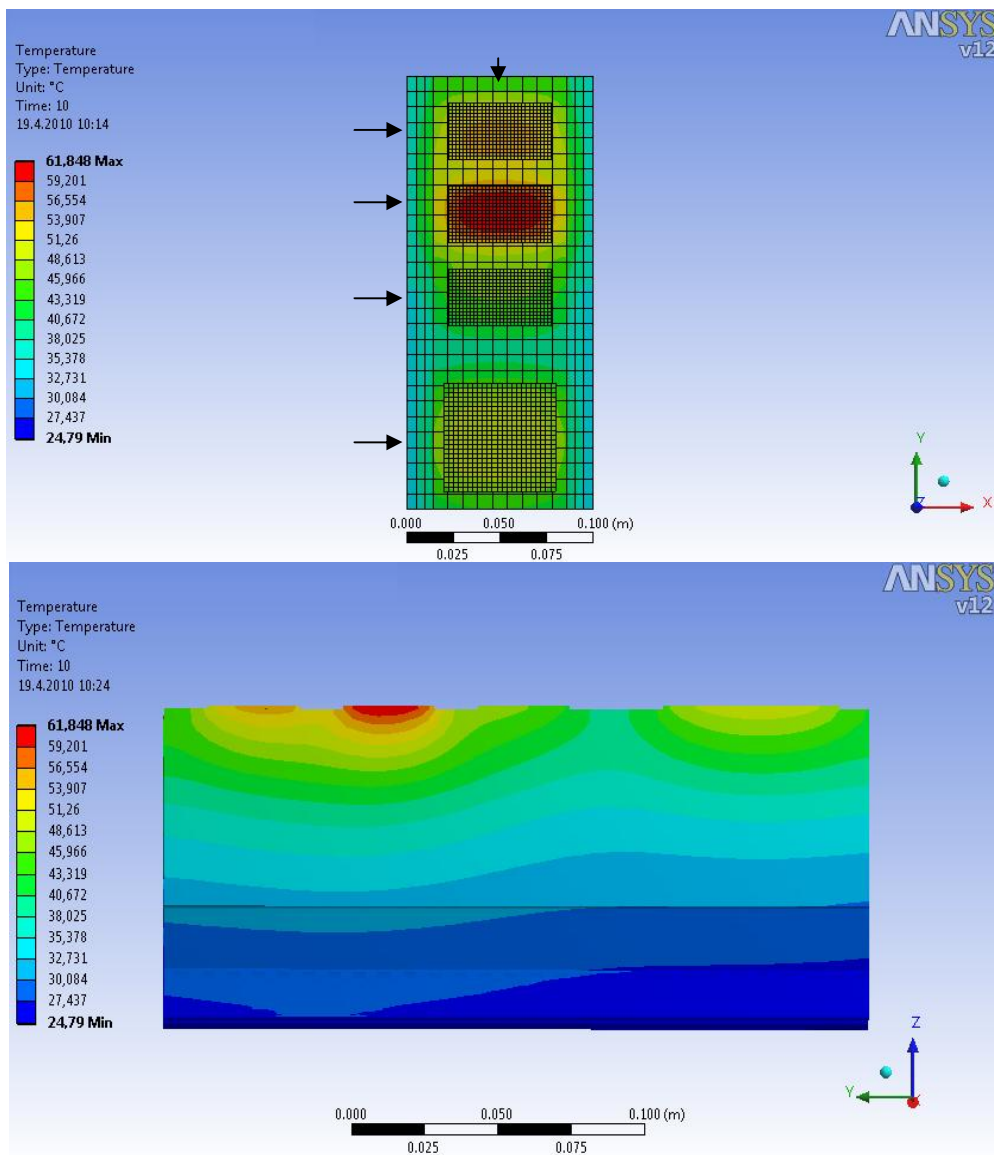
V simulaci využívám chladiče typu L140 o délce 240mm. Na chladiči jsou umístěny čtyři moduly o různém ztrátovém výkonu. Největší plochu zabírá modul SKD50/08/A3, za ním následují tři shodné moduly SK60GB125. Moduly nejsou v modelu zobrazeny, využívá se jen plocha definovaná kontaktní vazelínou, která je nanášena na spodní část modulu. Na modulu SKD50/08/A3 jsem zvolil ztrátový výkon $P_{\text{tot}}=100 \text{ W}$. Na modulech SK60GB125, jsou zvoleny ztrátové výkony na prvním modulu $P_{\text{tot1M}}=42\text{W}$, na druhém $P_{\text{tot2M}}=125\text{W}$ a na posledním modulu $P_{\text{tot3M}}=83\text{W}$.



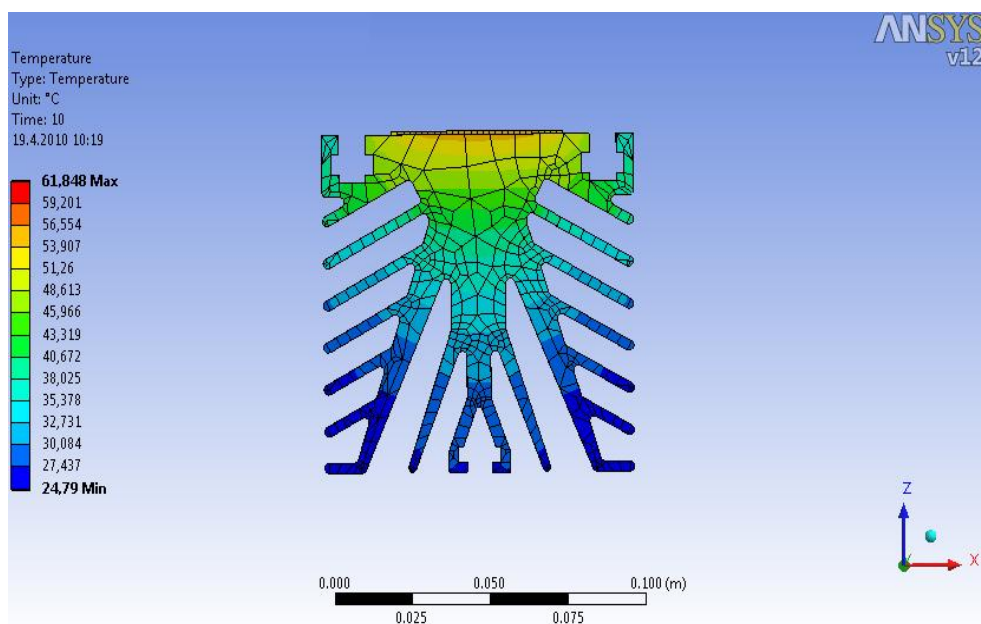
Obrázek č. 33: Vytvořená výpočetní síť

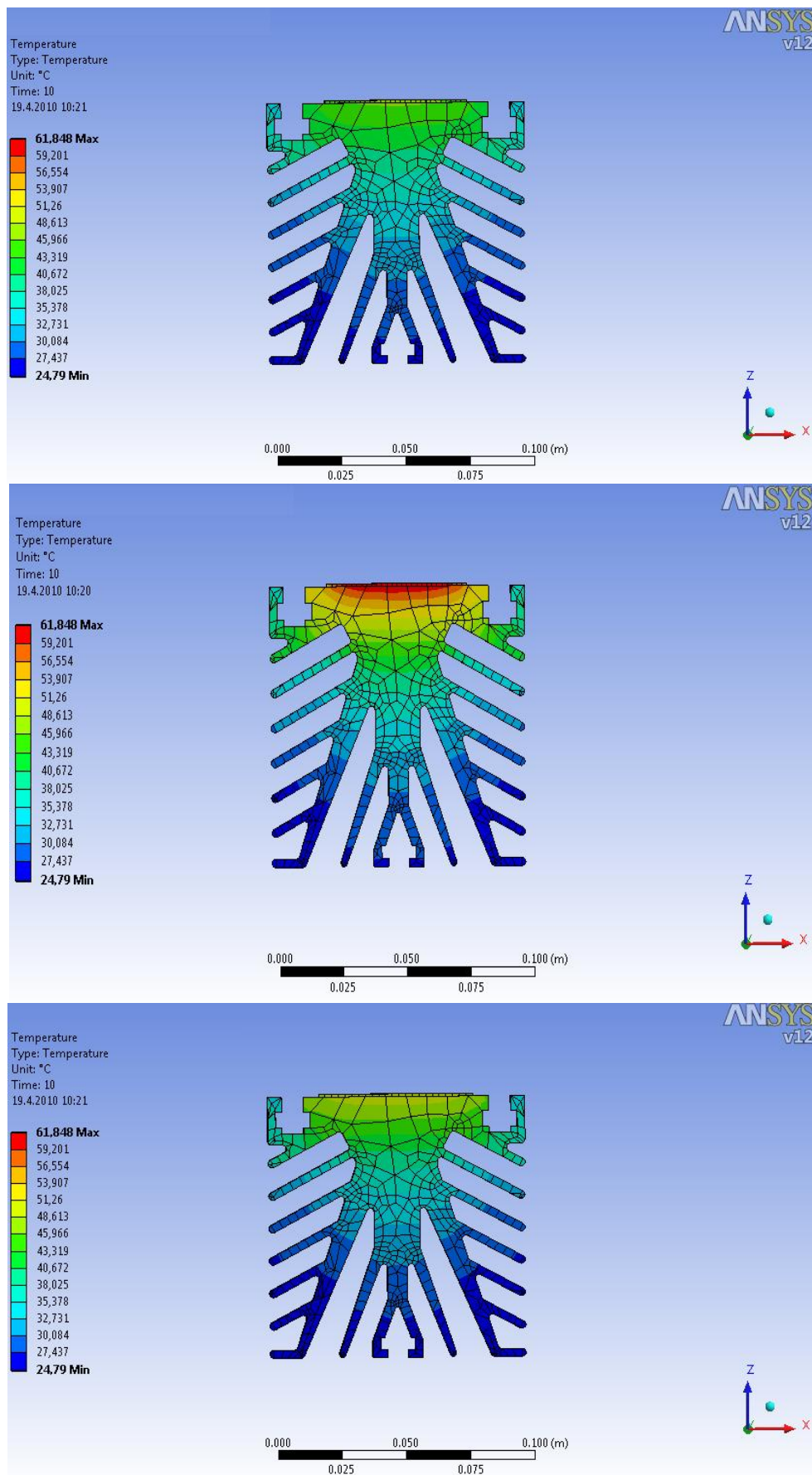


Obrázek č. 34: Tepelné pole chladiče L140



Obrázek č. 35: Vrchní část chladiče, řez středem chladiče





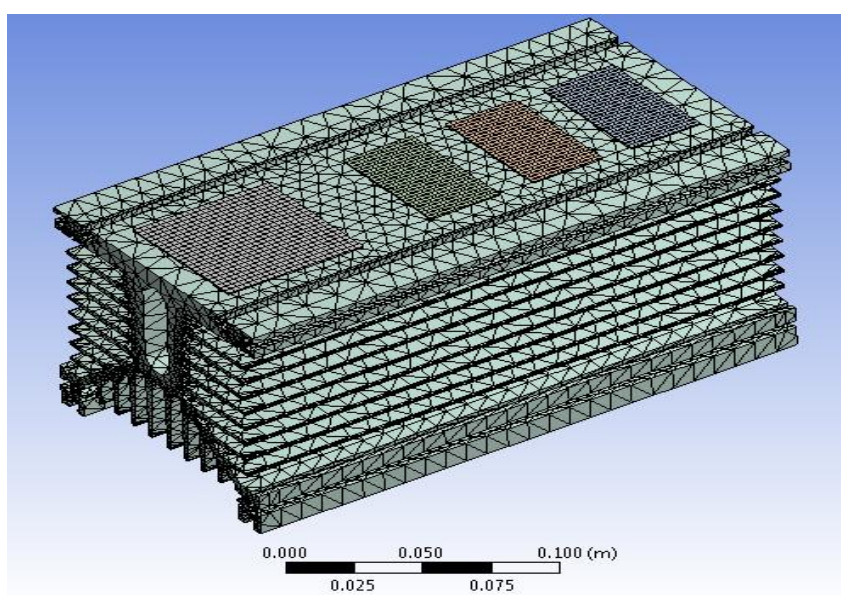
Obrázek č. 36: Jednotlivé řezy chladiče od prvního modulu k poslednímu modulu

Provedenou simulaci teplotního pole jsem zachytil na obrázcích číslo 34 až 36. Na obrázku číslo 37. je podélný řez modelem chladiče pro zobrazení ovlivňování jednotlivých polí tvořených rozdílným ztrátovým výkonem. Pole prostředního modulu SK60GB125, které je vytvořeno ztrátovým výkonem o hodnotě 125W, ovlivňuje tepelné pole zbylých modulů.

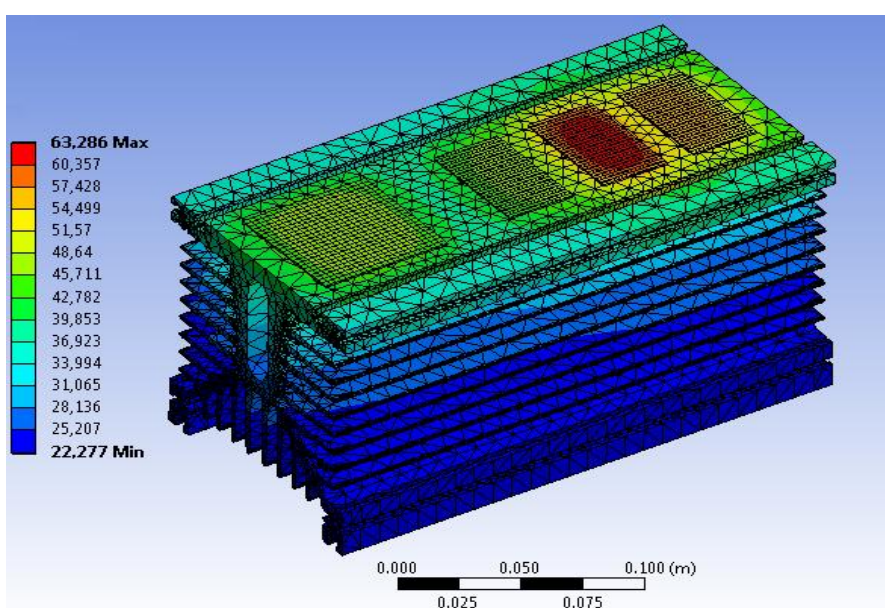
3.2.4 Simulace teplotního pole na chladiči P3 se ztrátovým výkonem 350W

Simulace je podobná předcházející simulaci, ale je změněn druh chladiče. Ztrátový výkon modulů je shodný s předchozí simulací. Model chladiče je konstrukčně upraven z důvodů provádění simulace pouze za přenosu tepla prostřednictvím vedení.

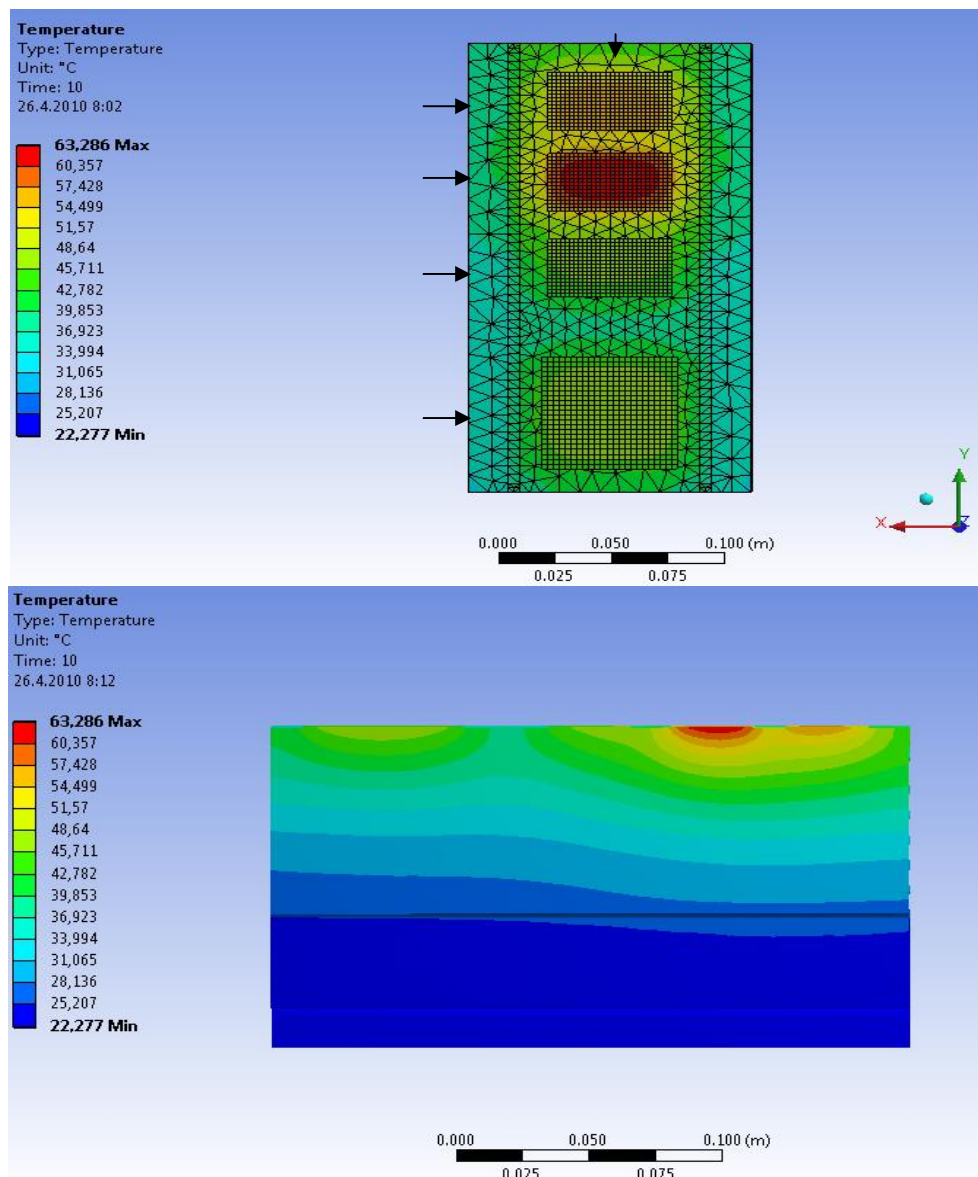
Výpočetní síť byla nastavena s mesh relovací o hodnotě 100 a velikost bodu elementu je shodná s předchozími simulacemi (hodnota rovna 4,9 mm).



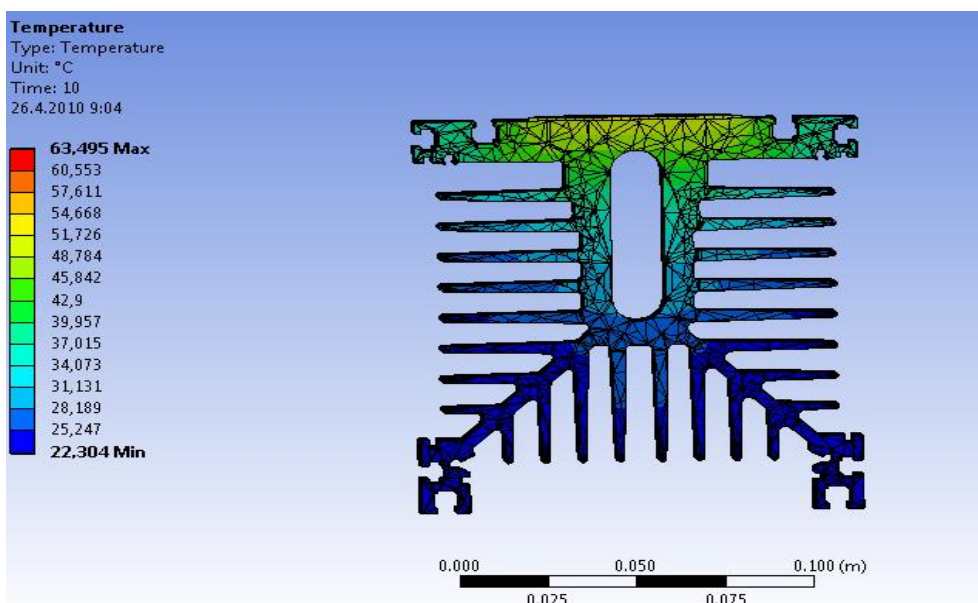
Obrázek č. 37: Vytvořená výpočetní síť modelu

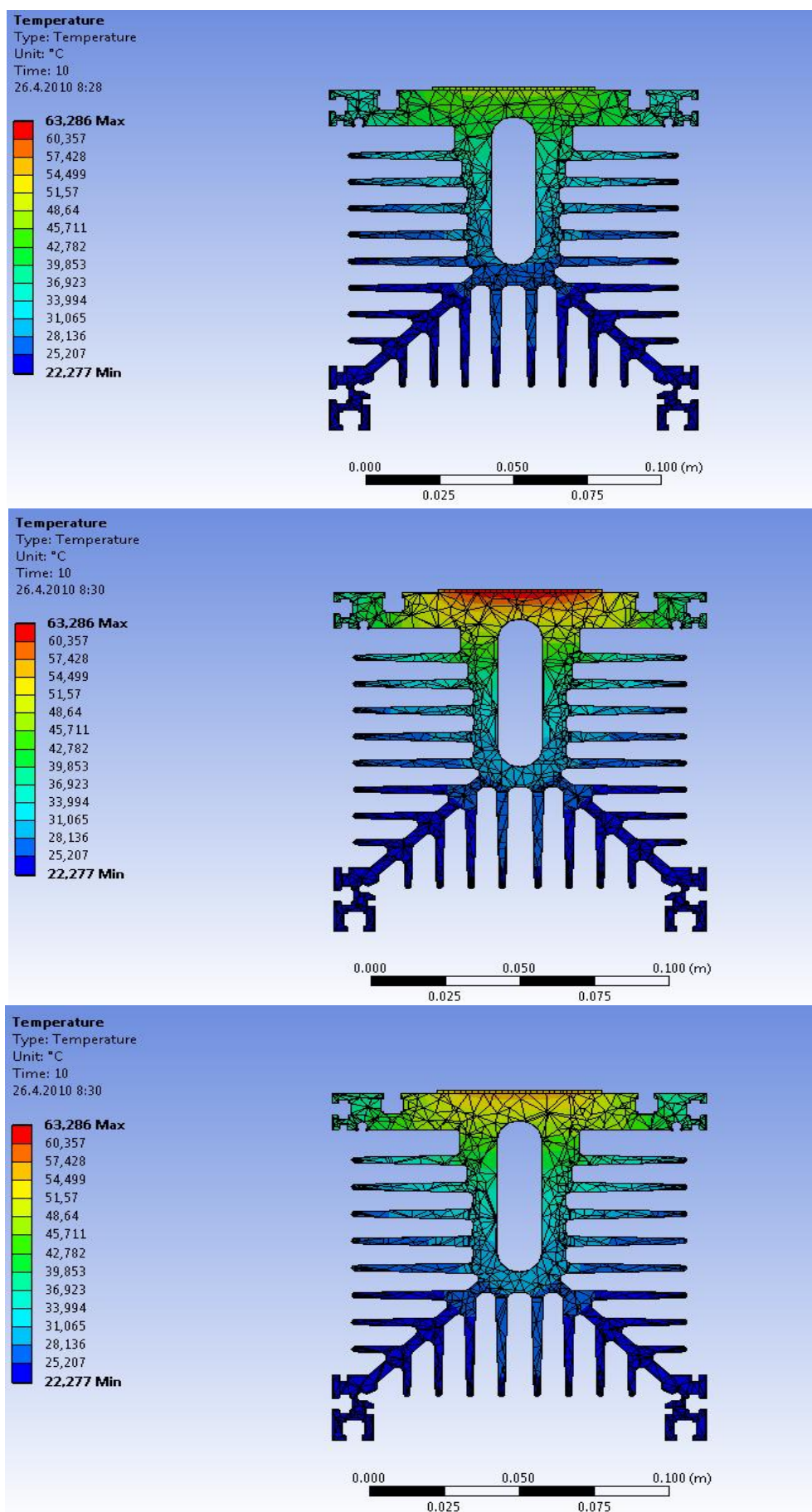


Obrázek č. 38: Tepelné pole chladiče



Obrázek č. 39: Vrchní část chladiče, řez hladíčem k zobrazení tepelného pole





Obrázek č. 40: Jednotlivé řezy chladiče od prvního modulu k poslednímu modulu

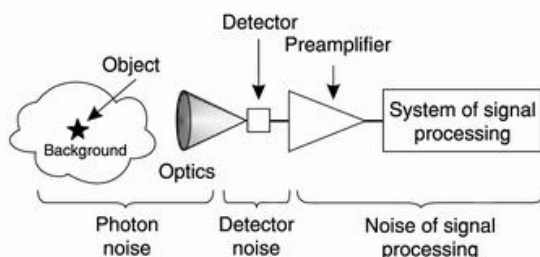
V programu Ansys jsem provedl simulace tepelných polí na dvou druzích chladičů. Celkově je zachyceno 8 simulací, kde první simulace jsou provedeny s jedním předpokládaným bezpotenciálovým modulem umístěným na chladiči L140 a P3. Simulace jsou rozděleny do tří ztrátových výkonů o hodnotách 100W, 300W a 500W. Jednotlivé výsledky jsou zachyceny na obrázcích. Poslední 2 simulace jsou provedeny na stejných typech chladičů, ale předpokládám 4 bezpotenciálové moduly. Tyto sestavy představují část nepřímého měniče kmitočtu. Pro obě simulace je shodný ztrátový výkon o celkové hodnotě 350W. Na jednotlivých modulech je nasimulován jiný ztrátový výkon. Výsledky tepelného pole jsou zobrazeny na jednotlivých obrázcích.

4. Experimentální měření tepelného pole

Pro praktické zachycení tepelného pole se využívá termovize. Termovize je termografická metoda založená na bezkontaktním měření intenzity infračerveného záření na povrchu předmětů a jejím výsledkem je termogram. Termogram je digitální obraz teplotního pole, ve kterém je k jednotlivým teplotám přiřazena definovaná barva. Rozložení barev je provedeno pomocí odstínů. Čím je odstín tmavší, tím je povrchová teplota nižší. Vyobrazený objekt a jeho okolí jsou různým způsobem rozloženy na jednotlivé elementární plošky a v daném čase zobrazeny jako termogram:

- Úplným rozkladem – skenování
- Částečným rozkladem – skenování v řádku či sloupci
- Bez rozkladu vstupní informace – s mozaikovým detektorem

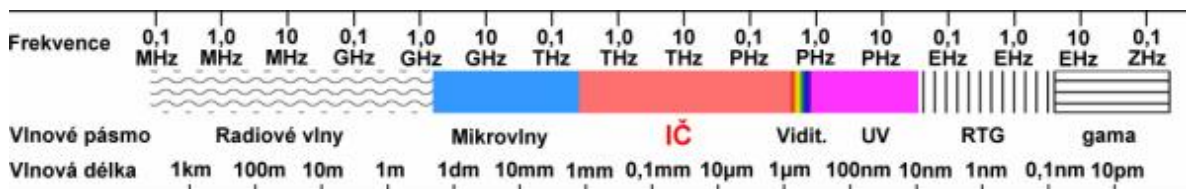
Termokamery jsou zařízení, která umožňují plošné měření a zobrazení teploty, dále zobrazení a záznam přítomnosti objektů v oblasti nebo noční vidění. Princip funkce infračervených kamer je shodný se snímáním viditelného světla. Snímání je prováděno zpracováním záření dopadajícího přes optiku na infračervený snímač. Snímač ho převádí na elektrický signál, následující obvody jej zesílí a analogově nebo digitálně zpracují do určité standardní podoby, která je ideální pro zobrazení nebo záznam. [8]



Obrázek č. 41: Princip zpracování snímání

[8]

U termografie se využívá měření částí elektromagnetického spektra, které je rozděleno na několik vlnových pásem. Tyto vlnové pásma jsou: radiové vlny, mikrovlny, infračervené záření, viditelná část spektra, UV záření, rentgenové záření a gama záření (viz obrázek č. 42). Měření infračerveného pásma se používá u termografie.



Obrázek č. 42: Infračervená pásma

[8]

Termokamera neměří přímo povrchovou teplotu, ale povrchová teplota se dopočítává na základě změřeného infračerveného záření a zadaných okrajových podmínek. Mezi nejdůležitější

okrajové podmínky patří emisivita povrchu a odražená energie. Emisivita povrchu je bezrozměrné číslo z intervalu 0 až 1, které udává pohltivost povrchu pro infračervené záření. Odražená energie bývá někdy uváděna jako odražená teplota. K další podmínkám patří vzdálenost mezi objektem a kamerou, relativní vlhkost a teplota vzduchu. Při neuvážení těchto vědomostí o okrajových podmínkách, může docházet k chybám v měření a tyto chyby mohou dosahovat až několik set procent.

[8]

4.1 Termovizní měření

Princip

- termovizní měření umožňuje získat viditelnou informaci o rozložení teploty snímaného povrchu
- využití vlastnosti vyzařování infračerveného záření povrchu objektu
- získaný obraz a termogram slouží pro vyhodnocení stavu zařízení
- porovnáním již známých termogramů z měření bez závad, resp. poruch, lze zjistit aktuální stav

Použití

- pro diagnostiku elektrických systémů a technologických procesů v průmyslu
- pro získání informace o rozložení teploty povrchu měřeného objektu, energetických zařízení,
- rozvodů, budov nebo jejich součástí pro vyhledávání vadných spojů, uložení, součástek, tepelně namáhaných míst
- pro identifikaci tepelně technických závad obvodových plášťů budov
- pro optimalizaci konstrukčních řešení
- pro vyhodnocování nejvhodnějších technologických postupů

Přednosti

- bezkontaktní měření bez nutnosti odstávky zařízení nebo demontáže
- včasná diagnostika poruch a havárií
- prevence neplánovaných odstávek a kalamitních stavů
- možnost záznamu reálného obrazu měřeného místa
- vysoká mobilita

Přínosy termovizního měření

- včasná diagnostika poruch a havárií
- prevence neplánovaných odstávek a kalamitních stavů
- předcházení haváriím v důsledku chybné montáže zařízení
- protokol o měření může být podkladem pro reklamaci chybné instalace
- bezkontaktní měření bez nutnosti odstávky nebo demontáže zařízení
- snížení ztrát spojených s odstávkou zařízení
- rychlost a snadnost měření
- zkrácení času potřebného na identifikaci závady
- snížení nákladů na údržbu zařízení a případné opravy

[7]

K provedení termovizního měření bylo využito infračerveného kamerového systému ThermoCamE45 od firmy Flir. Kamera měří a zobrazuje infračervené záření vyzařované objektem. Pokud je záření funkcí povrchové teploty objektu, potom je možné tuto teplotu zachytit, zobrazit a vyhodnotit.

ThermoCamE45 je lehká ruční přenosná kamera, která je prachuvzdorná, je testována na otřesy a vibrace. Pro dokumentaci měřeného objektu se obraz – termogram zaznamenává na vyjímatelnou PC kartu. Termogramy jsou vyhodnocovány v PC pomocí software ThermoCAM® Reporter 2000 Professional.

Tabulka technických parametrů ThermoCamE45

Parametr	Popis
spektrální rozsah	7,5–13 μm
typ detektoru	FPA (focal plane array), nechlazený mikrobolometr 160 \times 120 pixelů
Displej	2.5" barevný LCD displej, 16bitové barvy
Videovýstup	kombinované video CVBS (ITU-R BT.470 PAL/SMPTE 170M NTSC)
Přesnost	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $\pm 3,6\text{ }^{\circ}\text{F}$ nebo $\pm 2\text{ }\%$ ze snímané hodnoty
Teplotní rozsah	-20 až 250 $^{\circ}\text{C}$, s filtrem až 900 $^{\circ}\text{C}$
Komunikační rozhraní	USB, RS 232 (volitelné)
Korekce emisivity	Nastavuje se číslem nebo výběrem z předem definovaného seznamu

4.2 Vyhodnocení měření a simulací

Měření bylo provedeno na chladiči typu L140, na kterém byl vytvářen ztrátový výkon. Tepelné pole zachycené termovizní kamerou je uvedeno v termovizní zprávě, která bude přidána k diplomové práci. Zachycené tepelné pole se neshoduje s poli, která byla vytvořena simulací, jelikož při simulacích byl proveden přenos tepelné energie pouze pomocí vedení. V reálném měření nemůžeme vypustit i ostatní druhy přenosu tepelné energie, jako je proudění a záření, a musíme zohlednit ostatní okolní vlivy. Tepelná energie se z místa vzniku vyzařuje a proudí do okolí a ovlivňuje zdroj ztrátového výkonu. V rámci simulací je ztrátový výkon simulován přímo na tepelně vodivou kontaktní vazelinu. Tady však nebylo definováno žádné proudění ani záření do okolí, okolí simulovaného prostředí bylo nastaveno s nulovým prouděním a radiací.

5. Závěr

Cílem diplomové práce bylo provést simulace tepelného pole v chladiči. Abych mohl tuto simulaci provést, musel jsem nejdříve provést rozbor teoretických možností šíření tepla. Tato problematika je rozepsána v první kapitole, kde definuji jednotlivé přenosy tepelné energie pomocí fyzikálních zákonů. Přenos teplé energie se dělí na tři druhy: vedení, proudění, sálání. V reálném měření není možné se setkat pouze s jedním druhem přenosu tepelné energie, ale v rámci simulací lze jednotlivé přenosy samostatně rozdělit a provést simulaci. V rámci simulací tepelných polí jsem se zabýval pouze vedením tepla.

Abych mohl provést simulaci rozložení tepelného pole, vytvořil jsem 3D modely reálných komponent polovodičových měničů v programu Autodesk Inventor. Omezil jsem se jen na vytvoření komponent, které jsou činiteli vzniku a odvodu tepelné energie. Z těchto důvodů jsem vytvořil 3D modely polovodičových bezpotenciálových modulů umístěných na chladičích. V rámci simulace nebylo provedeno rozložení tepelného pole v oblasti bezpotenciálových modulů. Na základě neznalosti vnitřního uspořádání modulu a materiálového složení. Pro simulaci byly vytvořeny čtyři modely. První dva modely obsahují předpokládaný jeden bezpotenciálový modul umístěný na dvou druhých chladičů. Následující dva modely obsahují čtyři bezpotenciálové moduly.

Pro simulaci tepelného pole byl vybrán simulační program Ansys Workbench 12.1. Program Ansys je univerzální a aktualizovaný výpočetní program, který využívá metodu rozboru konečných prvků (FEA). Rozbor konečných prvků je numerická metoda dekonstrukce celého systému na velmi malé části tzv. elementy. Software realizuje rovnice, které řídí chování těchto elementů a řeší je všechny a vytvoří náhled na chování celé soustavy. Výsledky řešení soustavy jsou zobrazovány formou obrázku nebo tabulkou. Výsledky simulací byly zobrazeny formou obrázků.

Ve vlastní simulaci řeším rozložení tepelného pole v chladiči typu L140 a P3. Na tyto chladiče byl v prvních dvou simulacích předpokládán pouze jeden bezpotenciálový modul s definovaným ztrátovým výkonem rovným 100, 300, 500W. Z provedených simulací je patrné, že plné využití chladičů je na hodnotě ztrátového výkonu rovnému 500W. Po překročení tohoto ztrátového výkonu dochází k průchodu tepelné energie do nosné konstrukce, na které je chladič umístěn. Jednotlivá tepelná pole ztrátových výkonů byla zobrazena na obrázcích, kde je vidět celkové rozložení tepelného pole chladiče, průřez chladiče v místě středu modulu a v místě středového řezu chladiče. Na zbylých dvou simulacích byly předpokládány čtyři bezpotenciálové moduly o různých ztrátových výkonech. Na jednotlivých modulech byl simulován rozdílný ztrátový výkon, celkový ztrátový výkon byl předpokládán 350W. Teplené pole byla zobrazena na obrázcích. Z obrázků je patrné, že modul s vyšším ztrátovým výkonem vytváří tepelné pole, které ovlivňuje okolní pole ostatních modulů. Mezi jednotlivými bezpotenciálovými moduly byly mezery o velikosti 15 mm. Celková délka chladiče byla 240 mm. Aby se teplená pole vytvářené jednotlivými ztrátovými výkony neovlivňovala, musela by být mezera mezi moduly rovná nebo větší než 20 mm.

V rámci diplomové práce bylo provedeno termovizní měření. Pro zjištění rozložení teplot byla použita kamera ThermaCam E45 firmy Flir s příslušným vyhodnocovacím programem. Termovizní měření bylo provedeno na chladiči typu L140. Zobrazené teplené pole není zcela shodné s tepelným polem zobrazeným pomocí provedených simulací, protože z důvodů složitosti tepelných polí jsem se omezil na jeden druh přenosu tepla pomocí vedení. V reálném měření není možné se omezit pouze na jeden druh přenosu, protože tepelná energie je přenášena jak vedením tak i prouděním a sáláním.

6. Literatura

- [1] Hradílek Zdeněk. *Elektrotepelná technika*. VŠB-Technická univerzita Ostrava. Ostrava 1996
- [2] Autodesk, Xanadu. *Autodesk Inventor Suite 2009*. [online]. Poslední revize 30.5.2008. [cit.2010-04-11]. Dostupné z: <<http://www.xanadu.cz>>
- [3] POLOVODIČE, a.s. *Pokyny pro uživatele chladičů POLOVODIČE a.s.* [online]. poslední revize 28.9. 2008. [cit.2010-04-4]. Dostupné z:< <http://www.polovodice.cz> >
- [4] Leuchter J., Bauer P. *Analysis of losses in the power indirection converters*, Univerzita obrany v Brně 2005. Brno 2005
- [5] Andrew R. Mondi, Keith M. Mueller. *Tutora for Ansys*. [online]. Poslední revize 1.5.2009. [cit.2010-04-23]. Dostupné z:< <http://www.ansys.com/>>
- [6] Antonín Vojáček. *Automatizace.hw*. [online].poslední revize 28.5.2008.[cit.2010-04-20]. Dostupné z:< <http://www.automatizace.hw.cz> >
- [7] Vladimír Malík. *EGE*. [online]. poslední revize 26.5.2008 [cit.2010-04-22]. Dostupné z: < <http://www.ege.cz>>.
- [8] Termovize –Termografie. *Termografické měření* [online].c2006-2008.poslední revize 1.6.2006 [cit.2010-04-21]. Dostupné z:< <http://www.termovize.com/>>.
- [9] Opory PREE – *Dovolené oteplení*. [online]. [cit.2010-03-7].Dostupné z: <<http://feil.vsb.cz/kat451/>>.

7. Přílohy